

超长隧道面临的挑战与思考

洪开荣^{1,2}

1. 中铁隧道局集团有限公司, 洛阳 471009

2. 盾构及掘进技术国家重点实验室, 郑州 450001

摘要 随着交通强国战略规划的提出和全面实施, 中国的隧道及地下工程建设也迈入一个全新的时代。根据中国目前的隧道建设水平, 本文引入了超长隧道的概念, 介绍了修建不同超长隧道需要面临的技术挑战, 并展望了一些关键技术的发展趋势。

关键词 超长隧道; 深地探测; 防排水结构; 离岸结构

土木工程界按照修建长度将隧道划分为短、中长、长、特长等4个级别^[1], 其中铁路和公路根据各自特点在划分标准上有所区别, 铁路隧道的划分标准为: 长度 $L < 500$ m的为短隧道, $500 \text{ m} < L < 3000$ m的为中长隧道, $3000 \text{ m} < L < 10000$ m的为长隧道, $L > 10000$ m的为特长隧道^[2]。公路隧道的划分标准为: 长度 $L < 500$ m的为短隧道, $500 \text{ m} < L < 1000$ m的为中长隧道, $1000 \text{ m} < L < 3000$ m的为长隧道, $L > 3000$ m的为特长隧道^[3]。

这种划分方法简单明了, 且能较为中肯地评价隧道修建难度, 同时也反映出—个时期内隧道修建的综合技术水平^[4]。随着国民经济发展对交通路网基础设施建设需求的持续增强, 中国特长隧道的修建水平也在稳步提高, 成功修建的特长隧道已越来越多, 多座隧道长度超过20、30 km, 并且规划了更多20 km以上的隧道^[5-6]。从技术现状和建设规划看, 单单用“特长隧道”已经不能准确表述当前的技术水平和修建难度。综合

考量中国隧道修建的整体技术水平和运营管理现状, 认为修建20 km以上的隧道既是目前技术水平可以达到的长度, 又带来了各种边界条件下的挑战, 因此将20 km以上的隧道定义为超长隧道。

修建超长隧道要在现有技术基础上面对和克服更多难题与挑战。对于超长山岭隧道, 首先是埋深带来的问题, 超大埋深使地质钻探难以开展, 而高地应力、高地温进一步恶化了施工环境, 为施工人员和设备带来极大安全风险, 同时超长隧道超大体量的废渣排放也为自然环境保护带来了挑战^[7-9]。对于超长水下隧道, 水上勘测无法依照传统方式进行, 隧道前方充满了未知。大水深带来的高水压给掘进设备、结构防排水都带来了切实的压力, 同时也使得很多常规技术手段难以应用^[10-11]。本文将针对超长山岭隧道和超长水下隧道在修建过程中面对的技术挑战进行阐述, 并对超长隧道的技术发展方向进行展望。

收稿日期: 2018-04-21; 修回日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51327802)

作者简介: 洪开荣, 教授级高级工程师, 研究方向为桥梁与地下工程, 电子信箱: ctg-kr@vip.163.com

引用格式: 洪开荣. 超长隧道面临的挑战与思考[J]. 科技导报, 2018, 36(10): 93-100; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.10.010

1 国内外超长隧道建设现状

1.1 中国超长隧道建设现状

中国的超长隧道主要分布在铁路和高速铁路以及

水利水电工程中,18020 m 秦岭终南山公路隧道是目前中国最长的公路隧道,同时也是世界第二长的公路隧道^[12]。中国已建成的铁路及高速铁路超长隧道共 10 座^[13](表 1),中国已建及在建水工超长隧道共 11 座^[14](表 2)。

表 1 中国已建成的铁路和高速铁路超长隧道

Table 1 Summary of super long tunnels for railways and high-speed railways in China

序号	隧道名称	隧道长度/m	线别	建成时间	速度目标值/(km·h ⁻¹)
1	西秦岭隧道	28236	兰渝铁路	2015-12	200
2	木寨岭隧道	19095	兰渝铁路	2017-07	200
3	太行山隧道	27839	石太客运	2007-12	250
4	关角隧道	32690	西格二线	2014-12	160
5	中天山隧道	22449	南疆线	2014-12	160
6	乌鞘岭隧道	20050	兰武二线	2006-03	160
7	吕梁山隧道	20785	太中银铁路	2009-10	160(预留 200)
8	燕山隧道	21153	张唐铁路	2014-09	120
9	青云山隧道	22175	向莆铁路	2011-09	200
10	南吕梁山隧道	23443	瓦日铁路	2013-04	120

表 2 中国建成及在建的水工超长隧道

Table 2 Summary of hydraulic super long tunnels built and under construction in China

序号	工程名称	隧道长度/km	断面形式	直径/m
1	新马水电站	23.00	平底马蹄形	8.60
2	引大济湟工程大坂山隧洞	24.30	圆形	5.00
3	新疆供水工程喀一双隧洞	283.00	圆形/马蹄形	7.00
4	引洮供水一期工程总干渠	110.00	圆形/马蹄形	5.75
5	引汉济渭	81.78	圆形/马蹄形	8.02
6	大伙房水库输水(一期)工程	85.30	圆形/马蹄形	8.00
7	辽宁省重点输供水工程(水源工程)	100.00	圆形	8.50
8	辽宁省重点输供水工程(二段)	130.90	马蹄形/圆形	8.50
9	引松供水工程总干线 1 [#] 隧洞	22.60	圆形	7.93
10	引松供水工程总干线 2 [#] 隧洞	24.30	圆形	7.93
11	引松供水工程总干线 3 [#] 隧洞	23.00	圆形	7.93

中国在建的超长隧道有 6 座,其中大瑞铁路高黎贡山隧道长 34538 m,隧址区域被称为“地质博物馆”,地质特征可概况为“三高四活跃”,“三高”即高地热、高地应力、高地震烈度,“四活跃”即活跃的新构造运动、活跃的地热水环境、活跃的外动力地质条件、活跃的岸坡

浅表改造过程^[15](表 3)。

除此之外,根据国家路网的完善需求,中国在近期规划了 24 座待建超长隧道,数量上超过了已建和在建隧道的总和(表 4)。这些规划中的隧道有的尚在预可研阶段,有的已经进入施工图阶段,开工指日可待^[16]。

表3 中国在建的超长隧道

Table 3 Summary of super long tunnel construction in China

序号	隧道名称	隧道长度/m	线别	开工时间	速度目标值/(km·h ⁻¹)
1	当金山隧道	20100	敦格铁路	2013-04	120
2	高黎贡山隧道	34538	大瑞铁路	2014-12	140
3	小相岭隧道	21775	成昆二线峨眉段	2016-06	160
4	云屯堡隧道	22923	成兰铁路	2014-03	200
5	平安隧道	28426	成兰铁路	2013-03	200
6	崮山隧道	22751	蒙华铁路三荆段	2015-05	120

表4 中国规划建设的超长隧道

Table 4 Super long tunnel in China's planning and construction

序号	隧道名称	隧道长度/m	线别	速度目标值/(km·h ⁻¹)	阶段	备注
1	秦岭马白山隧道	22962	新建铁路西安十堰线	350	可研	单洞双线
2	秦岭九天山隧道	22294	新建铁路西安安康线	350	可研	单洞双线
3	延安隧道	23041	新建铁路西安延安线	350	可研	单洞双线
4	彝良隧道	22922	渝昆高铁	350	初步设计	单洞双线
5	甘青特长隧道	22380	西宁成都线	200	可研	双洞单线
6	海东南山特长隧道	25150	西宁成都线	200	可研	双洞单线
7	嘎尔希山隧道	20825	中尼铁路	120	预可研	单洞单线
8	Rauthesi 隧道	20205	中尼铁路	120	预可研	单洞单线
9	海子山隧道	32541	川藏铁路雅江至林芝段	200	预可研	双洞单线
10	芒康山隧道	30534	川藏铁路雅江至林芝段	200	预可研	双洞单线
11	伯舒拉岭隧道	28031	川藏铁路雅江至林芝段	200	预可研	双洞单线
12	沙鲁里山隧道	69000	川藏铁路雅江至理塘段	200	预可研	双洞单线
13	郭达山隧道	39200	川藏铁路泸定康定段	200	预可研	双洞单线
14	折多山隧道	40000	川藏铁路康定新都桥段	200	预可研	双洞单线
15	易贡隧道	50000	川藏铁路然乌通麦段	200	预可研	双洞单线
16	依洛隧道	21219	宜西铁路	160	预可研	单洞单线
17	坪寨隧道	20456	水城至盘县铁路	250(预留350)	可研	单洞双线
18	岷山隧道	24956	成兰铁路	200	施工图	双洞单线
19	云岭山隧道	29450	滇藏铁路香格里拉至邦达段	160	可研	单洞单线
20	东达山隧道	25315	滇藏铁路香格里拉至邦达段	160	可研	单洞单线
21	彝良隧道	22922	渝昆高铁	350	初步设计	单洞双线
22	田冲隧道	24872	普蒙铁路	160	预可研	单洞单线
23	巴音图隧道	20100	集阳线	120	预可研	双洞单线
24	南天山隧道	27980	伊宁至阿克苏铁路	160	预可研	双洞单线

1.2 世界超长隧道建设现状

目前世界最长交通隧道是瑞士的圣哥达基线隧道,总长 57 km。该隧道不仅超长,而且大部分地段埋深达到 1800 m,个别地段埋深 2200 m^[2]。隧道在施工过程中遇到了高地应力、高地温等诸多难题,历时 17 年修建贯通。除圣哥达基线隧道之外,欧洲各国和日本

等国也先后修建了多座超长隧道,其中有英法海底隧道、日本青函海底隧道等^[2](表 5)。

每一座超长隧道的成功修建都凝聚了建设者无数的心血,也为隧道及地下工程领域带来一次次技术飞跃,使人们有信心将目光投向更为深邃的地下和海洋,迎接更多的挑战与技术可能。

表5 世界超长隧道

Table 5 Statistics of super long tunnel in the world

序号	隧道名称	长度/km	国家	建成时间
1	圣哥达基线隧道	57.10	瑞士	2016年
2	青函海底隧道	53.86	日本	1983年
3	英法海底隧道	50.50	英国、法国	1994年
4	勒奇山隧道	34.60	瑞士	2007年
5	瓜达拉马隧道	28.40	西班牙	2005年
6	八甲田隧道	26.45	日本	2005年
7	岩手一户隧道	25.80	日本	1975年
8	莱达尔隧道	24.51	挪威	2000年
9	Lainzer隧道	23.84	奥地利	2009年
10	辛普朗隧道	19.80	瑞士、意大利	1905年
11	费尔艾那隧道	19.50	瑞士	1998年
12	布伦纳尔隧道	55.00	奥地利	在建
13	科拉尔姆隧道	33.00	奥地利	在建
14	里昂—都灵隧道	57.00	法国、意大利	在建

2 超长山岭隧道面临的挑战与思考

2.1 深部地下空间地质勘探方式亟需突破

超长隧道的埋深一般较大,如全长 34.6 km 的勒奇山隧道埋深 2000 m,全长 57 km 的圣哥达隧道埋深在 1800~2200m,全长 34.5 km 的高黎贡山隧道埋深在 800~1155m 左右。这些超大埋深导致地表钻探的钻孔加长,取芯效率降低,超长的隧道导致钻孔的数量也随之增加,整个钻探耗费的人力物力都将急剧增加^[17]。而从建设经验看,深埋隧道的地质情况复杂多变,建设者面对数十千米的隧道和超过 10 年的工期又需要尽可能详细的地勘资料进行施工方案的制定。

因此超长山岭隧道的地质勘探要面向未来,重点结合国家深地探测战略,将中国深部探测取得的研发成果尽快应用到具体隧道工程的地质勘探中(图 1)。一方面改进取芯方法,提高取芯效率,逐步淘汰提钻取芯,发展不取芯随钻测量技术和无钻杆钻进系统^[18]。另一方面是将中国在大功率地面电磁测量仪、无缆地震仪和无人机航磁系统等关键仪器研发方面取得技术突破因地制宜地应用到超长隧道的地质勘探中,进一步降低钻孔的数量。在将来超长隧道的地质勘探中,逐步形成以物探为主、洞内超前地质预报辅助验证的地质勘探思路 and 成套装备与技术,改变目前单纯依赖钻探取芯的地质勘探方法。

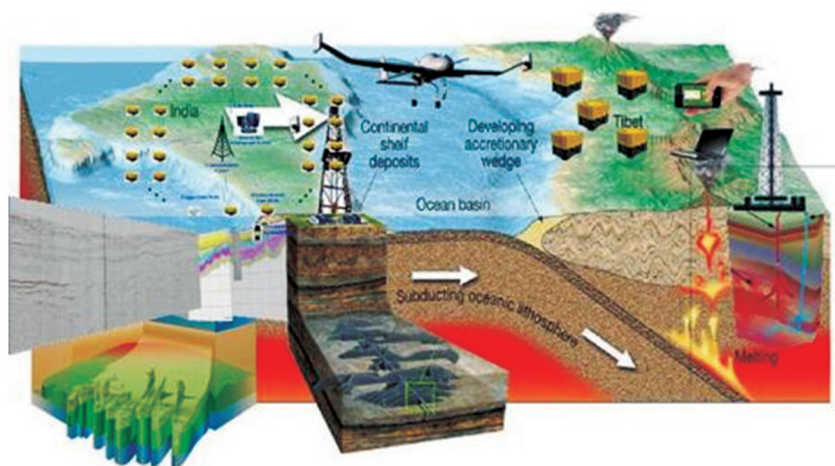


图1 深地探测技术

Fig. 1 Deep ground detection technology

2.2 深埋超长隧道施工方法选择面临考验

山岭超长隧道可选工法是钻爆法和会断面隧道掘进(TBM)方法,两种方法各有千秋、各具特色。从目前应用现状看,选择应用钻爆法的较多。但是从未来技术发展的方向看,应逐步采用TBM工法替代钻爆法,形成以TBM为主、钻爆法为辅的施工模式。从技术层面上讲,钻爆法解决长距离开挖的策略是增设辅助坑道,增加工作面,形成“长隧短打”的局面来弥补掘进速度的不足。当技术手段受限时,这样是非常有利于工程进度的。但是,目前TBM的设备水平和辅助技术都在不断革新,技术优势已经越来越明显。更为重要的是,很多超长隧道可选择的辅助坑道条件严重受限,且辅助坑道过长经济性太差,不具备“长隧短打”的条件。因此超长隧道在工法选择方面要审时度势转变思路,更多的考虑TBM方法,并进一步发掘该工法的潜力。

由于TBM对地质条件的针对性强,适应性差,对于不同地质条件需要设计不同的掘进机,TBM的选型是整个工程最为重要的一环^[19]。近年来也出现了对软硬复合地层有一定适应性的复合型TBM,但在实际应用中穿越软岩大变形段或者断层破碎带都没有很理想的表现^[20]。因此针对超长隧道丰富的围岩类型和各种极端的地质情况,未来全断面掘进机的研发方向无疑是性能更为优异,设备的通用性更强,最终目标是研发出全能型的TBM,设备选型将成为历史。

2.3 工程环境保护思路的重大调整

在隧道修建过程中对环境的影响是复杂而深远的,如对地下水的扰动和破坏、隧道废渣、废液、废气的排放和堆放问题。还有上述提到的“长隧短打”,增设斜、竖井等辅助工程对自然生态环境的影响更大。

对于建设过程中的环境影响,以往多认为是工程建设中认识不到位,对环境问题不够重视造成的。但从根本上讲这不仅是一个认识问题,更是一个技术问题。一方面是现有环保技术不够普及,目前对废水、废气以及废渣的解决方案多集中在市政工程方面,山岭隧道在处理这些问题时缺乏合适的解决方案,导致这些问题的长期存在^[21];另外一方面是隧道修建技术还需完善,以“长隧短打”为例,想要改变这一落后的设计理念须从提升隧道单个工作面施工能力着手,综合施工能力的提升才是减少辅助坑道数量的根本途径。

2.4 健康运营管理与防灾救援的观念革新

从目前隧道出现的各种病害来看,隧道运营期的结构安全状态不容乐观,世界范围内对于结构健康监

测的研究也处于起步阶段。很多都是被动式管理,病害已经形成甚至已经造成不良后果才被发现^[22]。在中国古代就有“治未病”的理念,这一理念不仅适用于医学也同样适用于隧道健康运营管理。

以往物联网技术不够成熟,人机交互能力弱,数据的采集与上传困难,尤其是高频次、大数据的自动化采集与分析满足不了要求。随着互联网、物联网技术的发展,已经具备了良好的人机交互、机机交互平台,为隧道结构健康全天候动态监测平台的搭建提供了技术条件。全天候动态监测不仅可以实现隧道健康状况的实时评估,还可以提供基于环境感知的减灾技术,真正做到防患于未然。

2.5 后寿命周期的隧道健康评估与重置技术

很多隧道在达到寿命周期后仍处于运营状态,其主要原因是隧道以及很多地下工程不具备二次建设的条件^[23]。超长隧道很多都是基线隧道,更难具备二次建设的条件,超期服役的现象也更为普遍。无论是对超长隧道还是普通隧道,结构的后寿命周期健康评估以及修复重置技术尚未有系统开展,给这些隧道的后续使用留下了巨大隐患。

隧道后寿命周期的健康评估是一个外延清楚、内涵模糊的“灰色系统”,其影响因素既有定性也有定量,且各因素之间彼此相关,相互作用^[24]。随着达到后寿命周期的隧道越来越多,隧道“老龄化”的相关问题也将越来越凸显。应在隧道运营管理的基础上建立后寿命周期健康评价体系,科学客观地评价隧道所处的健康状况,并据此制定相应的隧道结构修复重置技术,使超期服役的隧道也能延长寿命,更好地服务社会。

3 超长水下隧道面临的挑战与思考

3.1 超长水下隧道布置方式选择

水下隧道按照与河床、海床不同位置关系可以有3种布置方式。第1种是深入地下的钻爆法及盾构法隧道;第2种是放置于河床、海床之上的沉管法隧道;第3种是浮于水中的悬浮隧道。以往受限于整体技术水平,在修建水下隧道时深入地下的钻爆法和盾构法是首选布置方式。在水深不大、修建距离较短时考虑采用沉管法。悬浮隧道作为一个设想,自初次提出距今已有160年的时间,直到2016年第一条水中悬浮隧道在挪威松恩(Sognefjord)峡湾才正式开建^[25](图2)。

盾构法和钻爆法隧道与地层关系紧密,受地层状

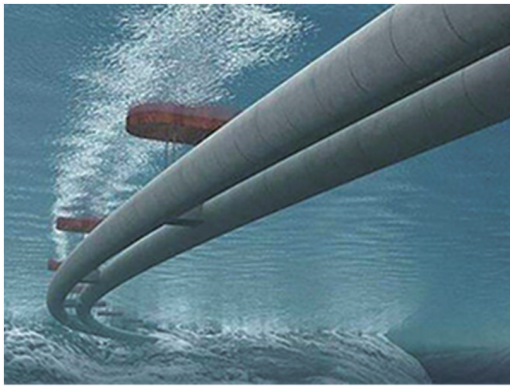


图2 挪威悬浮隧道效果图

Fig. 2 Design sketch of Norway suspension tunnel

况影响也最大。因此常常考虑避开不良地层而加大埋深,这样就导致隧道线路增长,掌子面水压的增大,给施工阶段的通风和设备密封带来难题,同时也使得维护运营费用较高,并且通行车辆的能量消耗较大。

沉管法对基础没有强度和承载力方面要求,但过硬的基础会导致基槽开挖困难。沉管法可以有效缩短线路长度,同一隧址处,可将隧道的长度有效缩短,运营条件相对较好。但沉管法受水深影响严重,大水深下基槽开挖整平精度难以达到,沉放对接精度难以保障,同时多次沉放的累计对接误差也会明显增加,因此沉管法可以接受的最大水深一般不超过 50 m。

悬浮隧道是想法最为新颖和大胆的隧道方案,且提供了多种布设方式,基本可以摆脱水深和地质方面的影响。目前受悬索锚固技术的限制,悬浮隧道难以大范围实施,且工程造价较高(挪威松恩隧道造价高达 250 亿美元),但由于受限因素最少且技术攻关方向明确,应用前景最为广阔^[25]。

对以上各种布设方式的选取原则并不是一成不变

的,而是随着开挖方法的重大技术创新而改变。以悬浮隧道为例,一旦悬索锚固技术得到实质性突破,悬浮隧道将成为最为经济的水下隧道形式。

3.2 地震状况下水下隧道安全保障技术

水下隧道多修建在复杂的地质环境下,隧址区域常处于地震高发地带,一旦发生地震,若隧道遭受严重破坏,后果将是灾难性的。目前,人们对陆上隧道的地震破坏机理和隔震技术已经取得了一定的研究成果,并应用泡沫混凝土材料和橡胶材料作为隔震材料,在隧道结构中设置隔震层、抗震缝等^[26]。

海底隧道在抗震问题上的边界条件比陆上隧道复杂得多,除了隧道衬砌和围岩之间选取合适材料设置隔震层之外,还应考虑改善隧道结构本身的刚度、质量、强度、阻尼等关键抗震因素,从多个方面提高隧道在地震发生时的结构安全性。

3.3 水下隧道防排水系统

从大量隧道的运营情况看,因隧道防水体系失效带来的结构渗漏水是较为普遍的隧道病害,轻则影响隧道正常运营,严重的情况下则会导致隧道关停。水下隧道,尤其是水下超长隧道必须要在在这个老问题上寻求新的解决办法。

对于钻爆法施工的水下隧道,目前以防水板和土工布形成的防水结构有较多问题。一方面是材质本身耐腐蚀性不强,易老化失效;另一方面是铺设工艺和后续施工工序容易导致防水板破损,从而防水失效。目前,最新的防水结构是喷层防排水体系,该体系是将排水盲管紧贴围岩布置并在初支之前喷涂防水材料在围岩表面形成致密的防水层,防排结合从而解决隧道防水问题,新型防排水系统与传统防排水系统对比如图 3 所示。这种防排水方法理念先进,易于操作且质量可

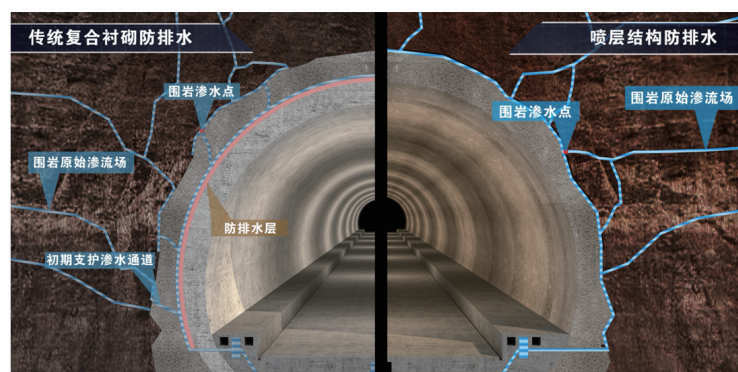


图3 新型防排水系统与传统防排水系统结构对比

Fig. 3 Structure comparison between new waterproof and drainage system and traditional drainage system

靠,成熟完善后将会给水下隧道的防排水设计施工带来巨大改变^[27]。

对于盾构法隧道的管片止水条、沉管法隧道以及悬浮隧道的止水带,虽然结构形式不同,但多采用橡胶材料制成。橡胶材料在疲劳荷载、沉降荷载以及河水、海水侵蚀作用下很容易发生老化,且难以及时发现。止水条、止水带通过受压变形填充混凝土结构之间的空隙从而实现密封防水,因此对这些部位更换或修复风险极高、难度极大。针对这些问题,沉管隧道方面已经有相应的设计改善,如防止Gina止水带过度压缩挤破的限位装置,便于Omega止水带修复更换的节段接头构造方案等,为后续盾构管片止水构造的跟进优化提供了参考^[27](图4)。



图4 止水条损坏后难以修复的盾构隧道

Fig.4 Shield tunnel which is difficult to repair after the damage of the water stop bar

3.4 离岸结构修建技术

超长水下隧道在设置海中通风竖井以及其他离岸结构时常常受到水深的限制。以现有的技术能力难以在水深超过20 m的区域修建海上人工岛,下面以港珠澳大桥人工岛的修筑为例说明^[28]。

港珠澳大桥人工岛筑岛处的水深在18 m左右,建设所需钢圆筒直径达到22 m、高度50.5 m、重500 t,是国内直径最大、高度最高的钢圆筒结构,也是世界上体量最大的钢圆筒结构(图5)。如果水深进一步加大,达到30、40 m时,钢圆筒相应高度就达到70~90 m,整个项目将变得难以实施。

目前,挪威等国采用新型沉井式修筑方法较为高效经济地解决了深水离岸结构的修筑问题,其构筑物如图6所示。这种结构的出现基本可以解决超长水下隧道的通风难题,也为海上盾构始发井的修筑提供了思路^[29]。



图5 港珠澳大桥人工岛筑岛钢圆筒

Fig. 5 Construction of an island steel cylinder in the artificial island of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge



图6 挪威 Draugen 海湾海上平台

Fig. 6 Norway Draugen Bay offshore platform

3.5 高水压下施工装备的适应性

中国规划建设渤海海峡隧道、琼州海峡隧道、台湾海峡隧道等超长水下隧道隧址区域的最大水深将超过100 m,如果采用盾构法进行修建,考虑覆土厚度则需要将盾构机的整体密封性能提到2 MPa以上才能满足要求^[23]。而目前采用盾构法修建的水下隧道最大水压都在1 MPa以内,盾构机的整体密封性能最高为1.1~1.6 MPa,与建设需求有较大差距,需要有较大的突破。

4 结论

对中国而言,修建超长隧道、完善国家路网是势在必行之事,其益不止于经贸商旅,其效不止于天堑通途。修建超长隧道既要面对大量世界级难题,也要敢于承接更多未知挑战,是中国土木工程行业技术自信和技术自强的集中体现。

参考文献 (References)

- [1] 王梦恕, 皇甫明. 海底隧道修建中的关键问题[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 1-4.
- [2] 洪开荣. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 123-134.
- [3] 王梦恕, 谭忠盛. 中国隧道及地下工程修建技术[J]. 中国工程科学, 2010(12): 6-12.
- [4] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.
- [5] 郭陕云. 隧道及地下工程的产业化发展方向[J]. 隧道建设, 2005, 25(6): 1-3.
- [6] 杨艳, 陈宝春. 世界跨海工程概况与台湾海峡通道可能性[J]. 福建建筑, 2007(8): 26-28.
- [7] 宋克志, 王梦恕. 国内外水下隧道修建技术发展动态及其对渤海海峡跨海通道建设的经验借鉴[J]. 鲁东大学学报(自然科学版), 2009, 25(2): 182-187.
- [8] 罗占夫, 肖元平. 南水北调西线隧洞独头通风 14 km 方案研究[J]. 隧道建设, 2011, 31(Suppl 1): 354-357.
- [9] 张全洲. 特长隧洞施工通风系统设计及应用[J]. 铁道建筑技术, 2011(7): 102-107.
- [10] 张琦, 朱淋淋. 港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道基槽开挖及清淤施工的质量控制[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(7): 97-100.
- [11] 郑伟. 港珠澳大桥沉管隧道深基槽回淤监测与分析[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(11): 25-28, 55.
- [12] 邵根大. 欧洲长而深的基线隧道[J]. 现代城市轨道交通, 2016(5): 94-97.
- [13] 赵勇, 田四明. 中国铁路隧道数据统计[J]. 隧道建设, 2017, 37(5): 641-642.
- [14] 陈益民, 周垂一. 中国水利水电地下工程数据统计(截至 2016 年底)[J]. 隧道建设, 2017, 37(6): 778-779.
- [15] 林镇定. 抓斗式挖泥船外海深基槽精确挖泥施工工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [16] 白云, 鲁洪昊. 沉管隧道接头 OMEGA 止水带损坏分析及修复技术[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(9): 87-92.
- [17] 冯欢欢, 姚兰. 复合式 TBM 地层适应性研究[J]. 建筑机械化, 2013, 34(8): 72-75.
- [18] 周垂一, 周永, 李军. 锦屏二级水电站引水隧洞施工总体设计[J]. 水力发电, 2010, 36(1): 14-16, 56.
- [19] 张琦, 朱淋淋. 港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道基槽开挖及清淤施工的质量控制[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(7): 97-100.
- [20] 沈家俊. 锦屏二级水电站深埋长引水隧洞勘测与设计的初步研究[J]. 水力发电, 1994(6): 13-17.
- [21] 孙树青. 钢圆筒围护结构在港珠澳大桥岛隧工程人工岛建设中的应用[J]. 中国水运, 2013, 13(5): 249-250.
- [22] 王云龙, 谭忠盛. 渤海海峡隧道竖井设置及施工技术探讨[J]. 中国工程科学, 2013, 15(12): 85-89, 100.
- [23] 肖明清. 大型水下盾构隧道结构设计关键问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [24] 张照煌. 全断面岩石掘进机盘形滚刀寿命管理理论及技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [25] 蒋博林, 梁波. 国内外拟建水中悬浮隧道设计方案研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 69-75.
- [26] 岳才权. 海底隧道的地震响应分析及隔震技术研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- [27] 黄柳楠, 李欣, 伍绍博. 水中悬浮隧道关键问题研究进展[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(12): 7-10, 70.
- [28] 钱七虎. 深部地下空间开发中的关键科学问题[M]//钱七虎. 钱七虎院士论文选集. 北京: 科学出版社, 2007: 20.
- [29] 吕勇刚, 黄清飞, 刘洪洲, 等. 长大深埋节段式沉管隧道节段接头构造方案比选[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 19-25.

Challenging problems facing the extra-long tunnel and some food for thought

HONG Kairong^{1,2}

1. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Luoyang 471009, China

2. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract Along with the strategy of building China into a country with a good transportation system, the constructions of tunnels and underground works in China has entered a new era. According to the current level of tunnel construction in China, this paper discusses the concept of extra-long tunnel, the technical challenges facing the construction of various extra-long tunnels, and the development trend of some key technologies.

Keywords extra-long tunnel; deep exploration; waterproof and drainage structure; offshore structure ●



(责任编辑 傅雪)