

渤海海峡隧道竖井设置及施工技术探讨

王云龙, 谭忠盛

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

[摘要] 渤海海峡隧道是国家铁路网和高速公路的重要组成部分, 修建跨海隧道意义重大。本文以渤海海峡全隧道方案为基础, 研究渤海海峡海底隧道竖井的设置及施工技术。通过对隧道掘进机(TBM)寿命的分析选取北隍城岛和北长山岛两处作为竖井布置点, 并通过施工通风及运营通风的计算和岛屿场地的研究论证竖井设置方案的可行性。通过对矿山竖井、铁路隧道及公路隧道竖井的施工技术分析, 得出渤海海峡海底隧道竖井应采用凿岩爆破一次成型法进行施工的结论, 同时明确了竖井表土施工应以堵水为主, 基岩段施工采取以合理的裂隙注浆技术为主的技术方案。

[关键词] 海底隧道; 竖井; 通风; 施工技术

[中图分类号] U459.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)12-0085-05

1 前言

竖井是长大隧道中施工通风、运营通风的重要组成部分, 同时也是施工工作的重要组成部分。相对隧道、横通道、斜井而言, 竖井的施工不仅需要大量的提升设备, 而且施工安全要求较高, 制约因素多且进度慢。因此, 对于渤海海峡海底隧道竖井的设置应在保证隧道通风需要的同时考虑施工的经济性; 竖井的施工则应充分考虑渤海海峡隧道的自身特点, 选择相应的施工方案。

根据渤海海峡的地质情况, 初步确定的隧道线路如图1所示。全隧道方案自旅顺老铁山下穿老铁山水域后, 向南依次下穿北隍城岛、小钦岛、大钦岛、砣矶岛、北长山岛和南长山岛后, 在蓬莱县城东侧上岸, 隧道总长度约为125 km。



图1 渤海海峡隧道线路图

Fig.1 The plan layout of Bohai Strait tunnel

本文以图1中初步确定的隧道线路为基础, 分析该隧道竖井的布置情况及施工方案。

2 竖井的布置

2.1 隧道掘进机(TBM)寿命分析

竖井的布置主要考虑以下因素: a. 竖井之间的间隔需满足TBM的寿命要求; b. 竖井的设置应保证施工通风的要求, 并满足运营通风的要求; c. 充分考虑利用现有岛屿条件, 避免设置人工岛。

在TBM寿命方面, TBM整机使用寿命主要是由关键部件的寿命决定的, 如主轴承、刀盘、刀盘驱动系统等。不同品牌的TBM对设备寿命的设计理念有所区别, 欧美系列的TBM关键部件设计寿命按照工作小时计算, 通常在隧道主体工程完工后剩余寿命富裕度较大, 而日本TBM的寿命设计以满足某一具体工程为准, 该工程完工后设备到达使用寿命。根据目前国内外TBM施工情况, 在TBM使用寿命上主要有以下经验: a. TBM的寿命一般由支承刀盘旋转的大轴承寿命和刀盘驱动装置的寿命决定; b. TBM关键部件主轴承和主驱动组件的设计寿命都大于15 000 h, 一般可累计掘进20~25 km隧道; c. TBM的大轴承直径一般为刀盘直径的60%左右,

[收稿日期] 2013-10-09

[作者简介] 王云龙(1982—), 男, 河北承德市人, 博士研究生, 主要从事隧道工程方面的研究; E-mail: wylbest@163.com

轴承直径越大,其承载条件越好,寿命越长;d. 我国辽宁省大伙房输水隧道长 85 km,其中约 60 km 隧道分为 3 段,采用 3 台 TBM 施工,每台 TBM 的寿命按掘进 20 km 的隧道长度设计;e. 高速铁路客运专线特长隧道长度大于 20 km 时,选用 TBM 施工的极限掘进长度应达到 25 km。

按照现有技术,能够保证 TBM 使用寿命达到 20~25 km。

根据 TBM 的寿命分析,只有老铁山水道宽度为 42 km,因此必须在老铁山水道的临近岛屿——北隍城岛和北岸岸边设置竖井。此外按照图 1 所示的隧道线路,北隍城岛距离北长山岛 49 km,在北长山岛设置竖井,TBM 的单向掘进长度为 25.5 km,能够满足 TBM 寿命要求。北长山岛距离蓬莱端 23 km,满足 TBM 寿命要求。因此,初步设置竖井的方案如图 2 所示。



图 2 渤海海峡隧道竖井初步设置方案
Fig.2 Shaft layout in Bohai Strait tunnel

2.2 施工通风的可行性

TBM 施工通风量通常按掘进工作面最多作业人数所需风量、不同地段不同风速所需风量、排除作业粉尘至允许浓度所需风量、冲淡内燃机械所排的有害气体至允许浓度所需风量以及机械散热至允许温度所需风量分别计算,再取其中最大值作为掘进工作面的所需通风量。

按照这些要求,计算渤海海峡隧道通风风量如下。

风机最大供风距离 L 与风机压风量 Q 、工作面需风量 Q_i 、管道漏风系数 P 等参数有关,这几个参数的关系应满足以下计算公式

$$Q_j = P_i Q_i \quad (1)$$

$$P_i = P_{100} \times L/100$$

式(1)中, P_{100} 为风管百米漏风系数。

基于 TBM 施工特点,在通风设计时不用考虑钻爆法施工时稀释、排放爆破有毒烟尘这一通风要求,而只需满足 TBM 及其后配套工作人员呼吸新鲜空气、TBM 各部件发热导致空气温度过高、稀释排除 TBM 掘进工作面内粉尘、运输车辆产生的有害气体稀释与排放等 4 个方面的需求。综合上述 4 个因素后,TBM 后配套对风速的要求不低于 $v=0.5$ m/s,考虑衬砌施工随后同步展开,因此按 $v=0.5$ m/s 计算 TBM 工作面的风量。例如,设计隧道断面面积 $A=78.86$ m²,则工作面需风量为 $Q=vA=39.43$ m³/s。

由于初步拟定的渤海海峡隧道断面为“主隧道+服务隧道+主隧道”的形式,所以可以采用巷道式通风方案,有关巷道通风的理论计算将另文介绍。根据我国大梁山隧道、麦积山隧道、泥巴山隧道等巷道式通风经验,巷道式通风目前在 10~15 km 的特长隧道中均取得了良好的通风效果,对于更长的隧道通风尚无具体工程实例,但采用巷道式通风这种通风形式时,只要采用足够多的风机就能保证长隧道的通风要求。

2.3 运营通风的可行性

2007 年 8 月,原铁道部科技研究开发计划“长大隧道通风关键技术研究”项目组对乌鞘岭隧道内的空气环境卫生状况进行了实测,认为对于电力牵引铁路隧道,在隧道长度大于 20 km 时有必要设置机械通风。

如渤海海峡隧道每段通风长度以 25 km 记,隧道断面面积 $A=78.86$ m²,当量直径为 $d=10$ m,隧道壁面沿程阻力系数取 0.015,空气密度 $\rho=1.225$ kg/m³,则计算隧道需风量为

$$Q = \frac{L_T A}{t} = \frac{25\,000 \times 78.86}{90 \times 60} \text{ m}^3/\text{s} \approx 365.09 \text{ m}^3/\text{s}$$

其中, L_T 为通风长度,m; t 为通风时间,s。

需要风速

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{365.09}{78.86} \text{ m/s} \approx 4.63 \text{ m/s}$$

隧道阻力及自然风压

$$\xi_n = 1.5 + \frac{\lambda L_T}{d} = 1.5 + \frac{0.015 \times 25\,000}{10} = 39$$

$$P_\lambda + P_\xi = \xi_n \frac{\rho}{2} v^2 = 39 \times \frac{1.225}{2} \times 4.63^2 \text{ Pa} \approx 512.07 \text{ Pa}$$

$$P_n = \xi_n \frac{\rho}{2} v_n^2 = 39 \times \frac{1.225}{2} \times 2^2 \text{ Pa} = 95.6 \text{ Pa}$$

其中, ξ_n 为自然风阻力系数; λ 为隧道壁面沿程阻力系数; P_λ 为摩擦风阻; P_ξ 为局部风阻; P_n 为隧道自然风压; v_n 为隧道内自然风速。

根据以上计算得到的所需风量及隧道阻力等信息可选择符合条件风机类型及风机数量。

总体上,对于电气化铁路隧道运营通风而言,根据现有研究成果,实现 20 km 以上隧道的运营通风在技术上是可行的。

2.4 岛屿自身条件

北隍城岛与北长山岛的卫星图见图 3 和图 4。

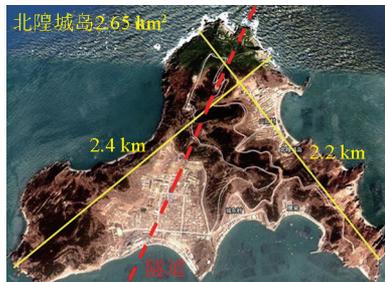


图 3 北隍城岛

Fig.3 Beihuangcheng Island

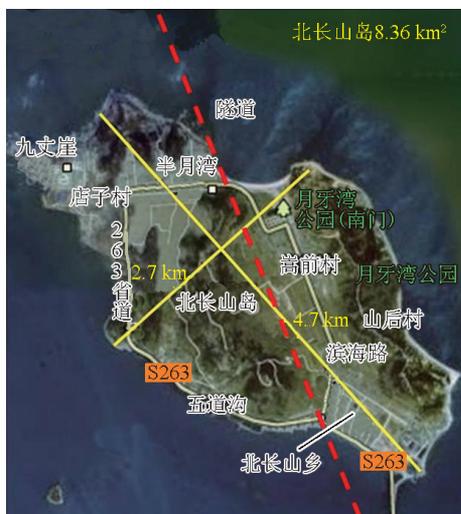


图 4 北长山岛

Fig.4 Beichangshan Island

根据国内地铁隧道竖井施工的场地需求经验,竖井施工所需场地一般为 2 000~3 000 m²。根据渤

海海峡隧道的初步施工安排,北隍城岛应具备能放置 6 台 TBM 的竖井施工场地,北长山岛应具备能放置 3 台 TBM 的竖井施工场地。从图 3 和图 4 可以看出,两座岛屿的面积较大且平整场地多,初步分析可满足施工的场地要求。经初步估算,北隍城岛竖井要负责 1.4×10⁷ m³ 的出碴量,碴土可堆积于附近海域。北长山岛竖井要负责 6.7×10⁶ m³ 的出碴量,岛上地形与面积对于设置竖井都较为有利,不利之处在于该岛村落和耕地面积较大,且环岛海岸地形平整,均为旅游或养殖的有利场地,隧道弃碴场的选择较为困难,初步分析后建议弃碴场选择在岛屿西侧利用价值较小的山区,利用岛上公路进行运输。

旅顺端岸边竖井及蓬莱端岸边竖井只用于施工通风和运营通风,而不作为 TBM 的施工工区, TBM 分别由两端洞口始发,因此竖井施工场地很容易满足要求。

综上所述,经初步分析研究,渤海海峡隧道只需设置旅顺端岸边竖井、北隍城岛竖井、北长山岛竖井和蓬莱端岸边竖井等 4 座竖井即可满足施工和运营要求,并做到最大限度减小竖井设置数量。

2.5 临时竖井

在图 1 的线路中,大钦岛与砣矶岛面积分别为 6.56 km² 和 7.37 km²,这两处岛屿都有几千人居住。按照上述竖井布置情况,北隍城岛和北长山岛两处竖井可基本满足施工通风与运营通风的要求,但从大钦岛与砣矶岛两岛常住人口数量看,在两岛设置临时竖井以备布置车站供岛上居民出行,同时设置临时竖井对缓解北隍城岛的出碴也有重要作用。

3 竖井的施工技术

3.1 常见竖井施工方法

目前竖井的应用主要为矿山工程及长大公路隧道,少数特长铁路隧道中也设置通风竖井^[1-5]。

1) 矿山竖井的施工方法可基本概括为两种,普通的钻爆法施工与特殊竖井施工法。普通的钻爆法施工用人工或机械凿岩爆破的方法进行竖井开挖。施工程序是先进行锁口施工,然后进行表土施工和基岩施工。这种竖井开挖法是目前竖井施工中比较常见的方法,适用于一般性竖井,并且取得了良好的应用效果。

特殊竖井施工法,采取的方法主要有板桩法、沉井法、冻结法、预注浆法、混凝土帷幕法和钻井法等。采用特殊竖井施工法主要是考虑到采用普通

掘进法难以达到目的,并且受到其他因素的影响,难以开展正常的竖井掘进。在实际竖井施工过程中,采用的具体方法很多,最终的目的是为了取得良好效果。

2)公路隧道与铁路隧道竖井的常用施工技术与矿山竖井施工技术大同小异。常见的两种施工方法为凿岩爆破一次成型法和反井法(先导井、后扩挖法)。

凿岩爆破一次成型法采用机械化配套作业自上而下施工,先开挖竖井井颈与表土段后,砌锁口圈,往下施工30~40m后安设多层吊盘,进行提升、悬吊等辅助设施的安设,然后转入井筒施工。多层吊盘的使用使多道工序能平行进行,提高了工作效率。井筒施工一次凿岩爆破成型,采用抓岩机装碴,单钩提升吊桶出碴,碴石全部由井口运出,用自卸汽车运至弃碴场。喷混凝土初期支护,液压滑动模板整体浇灌混凝土。为保持工作面空气清新,必须进行机械通风。

采用这种方法的类似工程有瑞士圣哥达铁路隧道 Sedrun 中间竖井(竖井深为836 m,开挖直径为8.6 m)、瑞士圣哥达公路隧道的两个竖井(Hospental 竖井深为303 m,开挖直径为6.76 m;Guspeisbach 竖井深为522 m,开挖直径为7.7 m)、中国江西曲江主井井筒的施工(竖井深为887 m,开挖直径为5.7~5.9 m)以及加拿大萨德伯里的 Graig 竖井(竖井深为1500 m,开挖直径为6.3 m)。

国内较有借鉴意义的工程为厦门翔安海底隧道竖井。该工程竖井砂层段涌砂现象较为严重,在该段竖井施工中因原设计的高压旋喷桩在动海水中的成桩效果差、钢板桩未能穿过卵石层等原因造成涌砂,在后续施工中开挖前采用钻孔切合桩加竖井内TSS管周边注浆预加固,取得了良好的施工效果,对富水地段的竖井施工有借鉴意义。该处切合桩及TSS管围护图如图5所示^[6]。

反井法利用普通反井法、吊罐法、爬罐法或反井钻机由下向上先施工一个小断面导井,然后利用导井作为溜碴孔由上向下采用爆破法扩大到设计断面,扩大过程中需进行必要的临时支护,再砌筑所要求的混凝土结构。这种方法充分利用反井法速度快和钻眼爆破法破岩效率高等特点,实现竖井井筒快速施工^[7]。

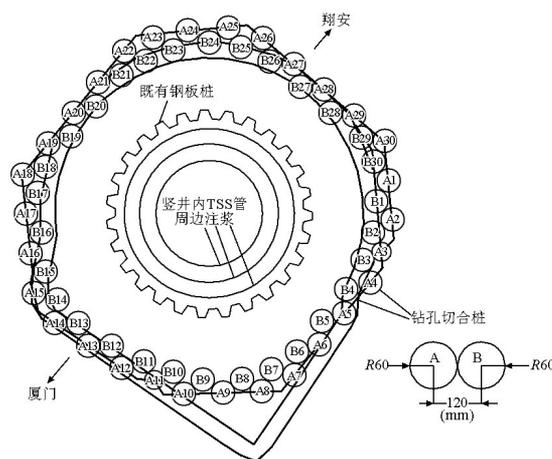


图5 竖井切合桩及TSS管
Fig.5 Pile of contact and TSS tube in shaft

反井法在雪峰山隧道3号竖井、龙潭隧道及秦岭终南山隧道中都得到很好的应用,其施工步骤如图6所示^[3]。

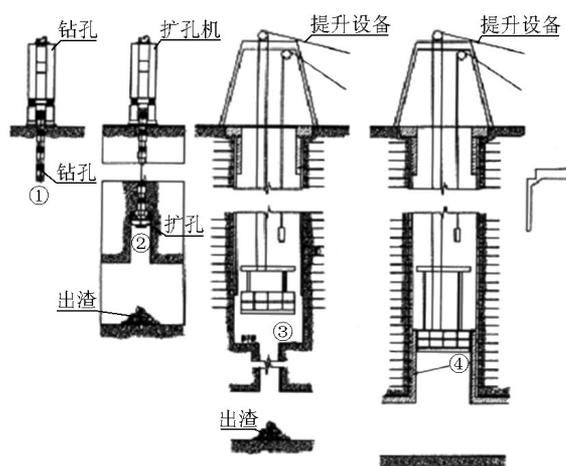


图6 反井法施工步骤
Fig.6 Construction sequence of after-expanding excavation

反井法在施工进度、施工能耗方面都有很大的优势,但如图6所示,在有竖井底部施工隧道的前提下才能使用该方法,因此对渤海海峡隧道并不适用。

3.2 渤海海峡隧道竖井施工技术

按照TBM断面设计,主隧道外轮廓直径为11.3 m,并且每个竖井均负责3条隧道的施工通风,因此竖井直径需达到13 m左右,开挖面积较大。反

井法并不适用,竖井的施工仍采用全井筒一次开挖,初期支护到达井底,井壁二次衬砌与中隔板采用滑模工艺由下至上整体浇注成井。这种方法的施工过程如下。

1)锁口施工。锁口由井颈上部的临时井壁和锁口框组成。锁口框采用木材、钢材、钢木结构;临时井壁段长度一般为1~2 m,采用砖、料石、混凝土块砌筑。若表土层稳定,可采用一次施工永久锁口。

2)表土施工。表土施工是渤海海峡隧道竖井施工较为关键的部分,由于竖井在岛上,施工时极易受水的影响,所以处理地下水问题十分重要。

海岛淡水资源稀缺,采用排水法对地下水影响较大,而冻结法与沉管法受场地制约明显,因此最为有利的方法是通过旋喷桩、钢板桩并结合注浆堵水等方法解决地下水的影响问题,辅助工法的选择应密切结合地质情况。

3)基岩施工^[8]。渤海海峡隧道初步设置的4座竖井均穿越第四系地层约30 m,其余地段为石英岩、板岩、花岗岩地层,且无较大断层,基岩施工最大的制约因素是裂隙水问题,因此注浆技术是竖井基岩段施工的关键。

根据基岩情况较为类似的青岛胶州湾海底隧道施工经验,注浆采用“裂隙注浆、堵水限排、统一标准、分类治理、预注后补”的原则。首先,统一注浆效果控制标准;其次,按围岩条件、涌水量等条件对工况进行分类,采用适用的注浆方式;最后,在每次注浆时均采取超前预注浆的方式,当开挖后发现未达到预期目标时,则采用补充注浆方案对渗水部位进行封堵。

根据围岩破碎情况、地下水涌水量等选择全断面注浆、周边裂隙注浆、局部断面超前裂隙注浆和补充裂隙注浆等注浆方式。

4 结语

通过对渤海海峡隧道竖井布置方法及施工技术的研究得出如下结论。

1)通过对TBM的寿命分析,在目前技术水平下TBM掘进距离可达到25 km,因此设置北隍城岛、北长山岛两处施工竖井能够满足TBM掘进距离的要求,且保证竖井设置数量最少。

2)通过对施工通风及运营通风的分析,采用巷道通风技术,本文提出的竖井设置方案能够满足要求;且北隍城岛与北长山岛均能满足TBM施工场地的要求。

3)借鉴矿山竖井及铁路、公路隧道竖井的施工经验,渤海海峡隧道竖井采用凿岩爆破一次成型法进行施工,表土施工时采用旋喷桩、钢板桩及注浆堵水等辅助工法,基岩段施工则重点进行裂隙注浆堵水,减小高水压的影响。

参考文献

- [1] 齐小勇. 秦岭终南山公路隧道通风竖井的施工技术与数值模拟[D]. 西安:长安大学,2008.
- [2] 徐爱民,尹复辰,郭小红. 雪峰山隧道3号竖井天井施工[J]. 中南公路工程,2006,31(1):131-134.
- [3] 王鑫. 西山特长隧道2号竖井开挖施工技术[J]. 山西建筑,2010,36(8):320-321.
- [4] 李小林. 山岭隧道竖井施工方案[J]. 铁路设计标准,2008(1):79-81,87.
- [5] 任少杰. 矿山竖井掘进方法分类探讨[J]. 中国高新技术企业,2013(10):133-134.
- [6] 程正明. 潮间带富水砂层海底隧道及竖井施工技术探讨[J]. 兰州交通大学学报,2012,31(6):33-38.
- [7] 刘志强. 反井钻井法施工特长公路隧道的通风竖井[J]. 公路,2007(4):208-211.
- [8] 徐玉峰,杨建华. 不同地质条件下竖井施工方法[J]. 施工技术,2009,38(1):55-57.

(下转100页)