

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.14.011

# 厦门海沧隧道排水系统设计

廖改霞<sup>1,2</sup>, 刘星<sup>1,2</sup>, 郭志杰<sup>1,2</sup>

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430050; 2. 武汉中交交通工程  
有限责任公司, 湖北 武汉 430050)

**摘要:** 厦门海沧隧道内排水系统设计的重难点是废水排除。为解决排水系统设计的关键技术问题,对隧道的排水量、废水泵房及污水泵房的形式、排水泵选型及数量、隧道运营初期的临时排污泵设计、废水泵房的出水总干管等进行分析。结果表明:对于矿山法海底隧道,其内部的结构渗水与消防废水等宜采用清污分排;位于隧道最低点的废水池建议设计为共墙的2格水池,其内部可围绕废水泵设计不锈钢检修平台;废水泵房可选用长轴式深井排污泵;隧道运营初期可采用2台临时排污泵进行排水;废水泵房的出水总干管建议1用1备,可采用316L不锈钢管与内外涂环氧树脂钢管相组合的设计。

**关键词:** 海底隧道; 排水系统; 结构渗水; 消防废水; 废水泵房

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)14-0063-06

## Design of Haicang Tunnel Drainage System in Xiamen

LIAO Gai-xia<sup>1,2</sup>, LIU Xing<sup>1,2</sup>, GUO Zhi-jie<sup>1,2</sup>

(1. CCCC Second Highway Survey, Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430050, China; 2. Wuhan Zhongjiao Transportation Engineering Co. Ltd., Wuhan 430050, China)

**Abstract:** The design of wastewater discharge in Xiamen Haicang tunnel poses a significant and challenging issue within its drainage system. This paper analyzed the determination of tunnel drainage volume, the configuration of wastewater pumping room and sewage pumping room, the selection and quantity of drainage pumps, the design of temporary sewage pumps during initial tunnel operation, and the main outlet pipe of wastewater pumping room, so as to address the key technical challenges in drainage system design of Haicang tunnel. Regarding the undersea tunnel constructed using mining method, it was essential to ensure that the internal structure seepage, and firefighting wastewater were discharged separately. The proposed design for the wastewater tank at the lowest point of the tunnel was a two-cell tank with a common wall. Additionally, a stainless steel maintenance platform was designed around the wastewater pump in the wastewater tank. For the lowest point wastewater pumping room of the long-distance submarine tunnel, it was recommended to utilize a long-shaft deep-well sewage pump. Temporary sewage pumps might be utilized for tunnel drainage during the initial stage of operation. It was recommended to use a main outlet pipe for the wastewater pumping room with a backup, and consider adopting a design that combined 316L stainless steel pipe with epoxy resin coated steel pipe both inside and outside.

**Key words:** submarine tunnels; drainage system; internal structure seepage; firefighting wastewater; wastewater pumping room

厦门海沧隧道为国内已通车运营的第3座矿山法海底交通隧道,具有长度大、净高差大、结构渗水量较大、地处海洋环境等特点,排水系统设计的重难点在于隧道内的废水排除<sup>[1]</sup>。

李治国<sup>[2]</sup>对矿山法海底隧道结构防排水技术进行了研究;周金忠等<sup>[3-4]</sup>对海底隧道的废水泵提升方案、供水管爆管理念、爆管控制技术以及废水池容积的确定等进行了讨论,并以青岛胶州湾海底隧道工程为依托,对废水系统排水能力的确定、废水提升方案的选择及废水泵房优化设计等进行了分析,探讨了矿山法海底隧道废水排水系统的主要关键技术;吕青松等<sup>[5]</sup>以青岛胶州湾隧道和厦门翔安隧道为例,采用理论分析和数值计算等方法对水下长大隧道排水系统存在的问题进行梳理,并对隧道防水、水泵选型、管道系统设置、水锤防护、集水池容积确定等关键排水系统设计提出建议;何潇剑等<sup>[6]</sup>针对目前国内水下隧道排水系统无明确规定的现状,根据排水系统的类型和特点,对汕头苏埃湾长大海底隧道排水设计中存在的技术难题进行研究,并提出解决方案;戴新等<sup>[7-8]</sup>以珠江口铁路隧道为工程背景,对组合工法海底隧道的防排水原则和标准进行分析,并对该工法海底隧道的排水系统进行研究。上述研究均以具体的海底隧道为对象,而海沧隧道排水系统在隧道防水、集水池容积确定、排水泵选型及数量、隧道运营初期的临时排污泵设计、排水干管的设置及针对高盐环境的抗腐蚀设计、自动化优化设计、运营维护人性化设计等方面均有创新之处,可为类似项目提供参考。

## 1 项目概况

厦门海沧隧道为矿山法海底交通隧道,双洞六车道,采用一级公路兼城市道路标准(见图1)。



图1 海沧隧道实景

Fig.1 Actual photo of Haicang tunnel

隧道跨海段设置为行车主线隧道+服务隧道的形式,厦门端有A、B、C三条匝道。主线隧道与服务隧道均为V字型,全隧道仅在海域内存在1个最低点。主线隧道单洞长6 280 m,其中跨海段长2 000 m;服务隧道长3 885 m。

## 2 排水量确定

海沧隧道排水系统遵循“高水高排、低水低排”的设计原则,分为隧道内排水系统、隧道洞口排水系统及隧道外排水系统。其中隧道内排水系统关系整座隧道的运营安全,其设计也最为复杂。

隧道内排水系统主要排出隧道的结构渗水、消防废水、道路冲洗水、事故水等。结构渗水为清洁的海水,由隧道专业设计的侧盲沟收集;消防废水中含有化学物质,消防废水、道路冲洗水等流经路面时,随路面的灰尘、油污等一并流入道路两侧的排水边沟,故这些水是被“污染”的水,其中火灾时的消防废水量远大于非火灾工况下的道路冲洗水或事故水量。

根据《公路水下隧道设计规范》(JTG/T 3371—2022)12.2.2条,洞内集水池的有效容积宜按以下原则确定:①洞内污水集水池有效容积可取排水分区内一次性消防水量;②洞内清水集水池有效容积可取排水分区内24~48 h结构渗水量总和。

海沧隧道相较于盾构法或沉管法水下隧道,其结构渗水(清水)量较大,约4 000 m<sup>3</sup>/d,消防废水量约110 L/s。采用清污分排的方案,结构渗水通过废水收集系统及最低点的废水泵站提升至海沧端的隧道外,排至大海;消防水、道路冲洗水及事故水通过污水收集系统及最低点的污水泵站提升至本岛端的隧道外,排至市政污水管网。

根据隧道主体设计资料,海沧隧道的防水等级应满足《地下工程防水技术规范》(GB 50108—2008)规定的二级防水标准。根据平面模型的计算结果,得出该隧道的防水标准:行车隧道单洞平均渗水量 $<0.2 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ,服务隧道平均渗水量 $<0.1 \text{ m}^3/(\text{m}\cdot\text{d})$ ,故隧道总的结构渗水量 $V_{\text{渗}}=2\,900.5 \text{ m}^3/\text{d}$ ,小于估算值4 000 m<sup>3</sup>/d,最终确定海沧隧道结构渗水量的设计值为4 000 m<sup>3</sup>/d。海沧隧道洞内清水集水池的有效容积按全隧道36 h结构渗水量的总和确定, $V_{\text{清}}=6\,000 \text{ m}^3$ 。

该隧道的消防系统由消火栓系统+泡沫/水喷雾系统+灭火器组成,其中消火栓系统的设计水量为

20 L/s,火灾延续时间为4 h;泡沫/水喷雾系统的设计流量为90 L/s,泡沫混合液喷射时间 $\geq 20$  min,水喷雾防护冷却时间 $\geq 60$  min,其中泡沫液的浓度 $\geq 3\%$ ,故一次性消防总用水量,即洞内污水集水池的有效容积 $V_{污}=720\text{ m}^3$ 。

### 3 隧道内排水系统设计

#### 3.1 废水泵房及污水泵房形式

该隧道最低点废水泵房采用下沉式方案,在最

低点位置扩大断面衬砌结构,通过设置1处横向连接通道,与左右主洞连通,将主洞清、污水引至扩大段集水池内(见图2)。

扩大断面通过水平隔板分成上下两层,上层除具有设备间功能外,还利用剩余空间作为临时休息室、设备检修室等;下层空间用于储存清水及污水,清、污水通过设置隔墙分开集排,实现各区疏干检修。

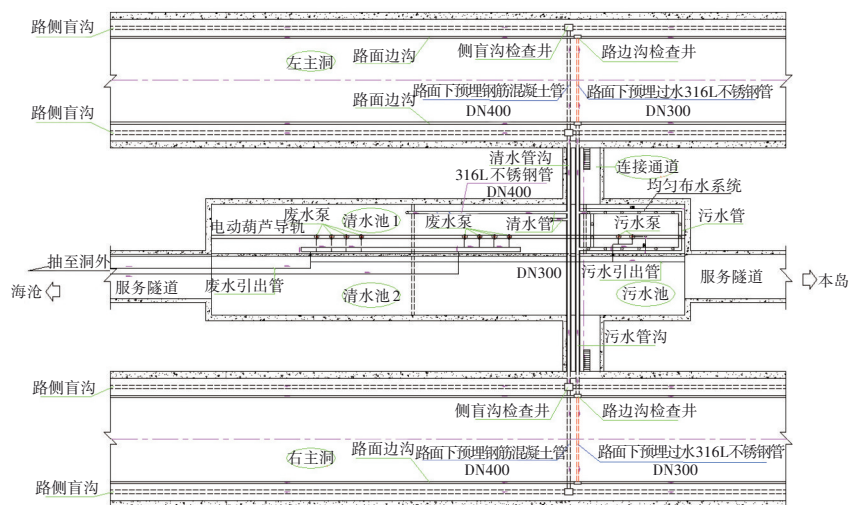


图2 隧道最低点废水泵房及污水泵房平面设计

Fig.2 Plan design of wastewater pumping room and sewage pumping room at the lowest point in the tunnel

清水集水池蓄水间长约100 m,宽约16 m,有效水深约5 m,通过隔墙分成2座容积大致相等的清水蓄水池(见图3)。

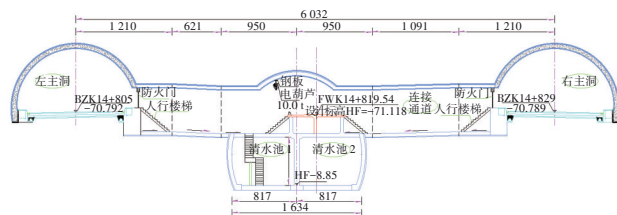


图3 隧道废水泵房横断面设计

Fig.3 Cross-section design of wastewater pumping room in the tunnel

在日常情况下,2座蓄水池同时进水,各开启1台排水泵排水;需要清淤时,则选择性关闭一侧蓄水池内的进水管及排水泵,全隧道废水进入另一座蓄水池,并开启该蓄水池内的2台排水泵进行排水。

海沧隧道采用全包式防水的衬砌结构设计,相较于半包式防水,结构渗水量大幅减少,降低了最低点废水泵房的排水压力。同时废水池的实际容积有较大余量,当隧道出现水害险情时,可为险情

的有效处理提供必要的条件。

#### 3.2 排水泵选型及数量

国内水下隧道常用的排水泵类型包括潜污泵、长轴式深井排污泵、干式泵等,其中潜污泵及干式泵的扬程大多低于500 kPa。经水力计算,若最低点污、废水采用一级提升,废水泵和污水泵的扬程需为1.2 MPa左右,干式泵和潜污泵均不符合;若采用二级提升,土建专业需在隧道中部额外增加1处与最低点同容积的污水池及废水池,将增加上亿元的造价,且接力排水的2处泵房运营后的电费及管理成本均会增加。从经济性及运营管理方面考虑,该设计最低点的污、废水采用一级提升,排水泵均选用耐强腐蚀的双相不锈钢长轴式深井排污泵,立式安装。

每个蓄水间内的排水泵均设置于1个较大的集水坑内并预留一定的空间(见图4),该设置在防止水泵被泥沙堵塞方面优于1台水泵1个泵坑的做法。

海沧隧道废水排出量约4 000 m<sup>3</sup>/d,若出现废水



泵损坏、抢修不及时的情况,渗水量短时间内在废水池内大量留存,将给隧道的运营安全造成巨大威胁,故采纳建设单位的建议,通过增加废水泵的备用数量来提高废水排水系统的安全系数。废水泵房共设置8台水泵,单泵 $Q=425\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $H=1.25\text{ MPa}$ 。

8台水泵分2组,分别在2座蓄水池内安装,每组水泵中的1台轮流运行,其余备用,共2台水泵同时运行并向洞外排水,设计说明中特别强调“隧道运营后应加强水泵的维护管养,及时更换或维修发生故障的水泵”。

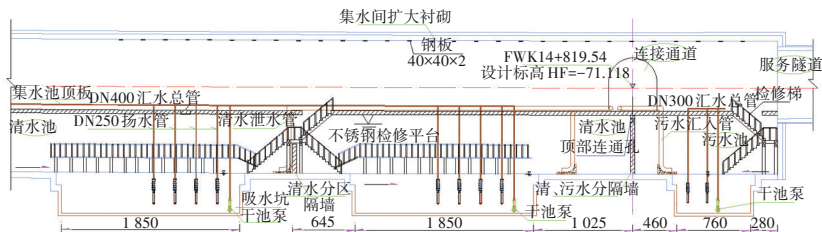


图4 隧道废水泵房及污水泵房纵剖面设计

Fig.4 Vertical-section design of the wastewater pumping room and the sewage pumping room in the tunnel

由于该隧道最低点废水排水干管路由较长,且排出口与泵房的高差较大,导致排水泵的扬程较高,停泵时水锤现象严重,会对水泵造成较大的影响。此外,采用涂塑钢管作为排水管材的系统会频繁发生弥合水锤,水锤形成过程中的真空作用加上水锤的撞击作用易使涂塑层发生剥离,影响管材的防腐效果。为降低最低点排水系统水锤的影响,对泵房内的排水干管采取如下措施:①设置多级微阻缓闭消声止回阀;②加装压力缓冲罐;③设置水锤消除器。

### 3.3 隧道运营初期的临时排污泵设计

矿山法隧道在运营初期,由于土建施工遗留很多杂质,其废水中存在较多的泥沙、石子等废弃物,水中颗粒物较多且粒径较大,易导致废水泵堵塞损坏,故结合翔安隧道<sup>[5]</sup>的经验,在废水泵房内设计2台临时排污泵,专门用于隧道运营初期的排水。为降低造价,对临时排污泵的材质和使用寿命要求相对较低,对颗粒物等杂质的防磨、防砂、防缠绕的要求相对较高。待后续废水池中水质慢慢清洁后,再安装8台永久性的废水泵并投入运营,尽可能为永久泵创造较好的水质环境,降低其叶轮、电机等损坏的概率,提高废水泵的使用寿命。

在经济性方面,临时排污泵的价格约10万元/台,远低于316L不锈钢永久泵(约56万元/台),前者有效地保护了后者,间接地创造了经济效益。

### 3.4 排水干管的设置及抗腐蚀设计

海沧隧道最低点废水泵房的出水总干管设置于服务隧道中板下的管廊内,出水口位于海沧端,距离最低点约2.4 km,排水路径长,且管廊内较为

潮湿、空气中盐分高,干管极易腐蚀生锈。由于废水为不间断产生的结构渗漏水(海水),必须保证最低点废水能够及时排出隧道,为此泵房设置2根完全独立的废水排水干管(1用1备),管径均为DN400(见图5)。

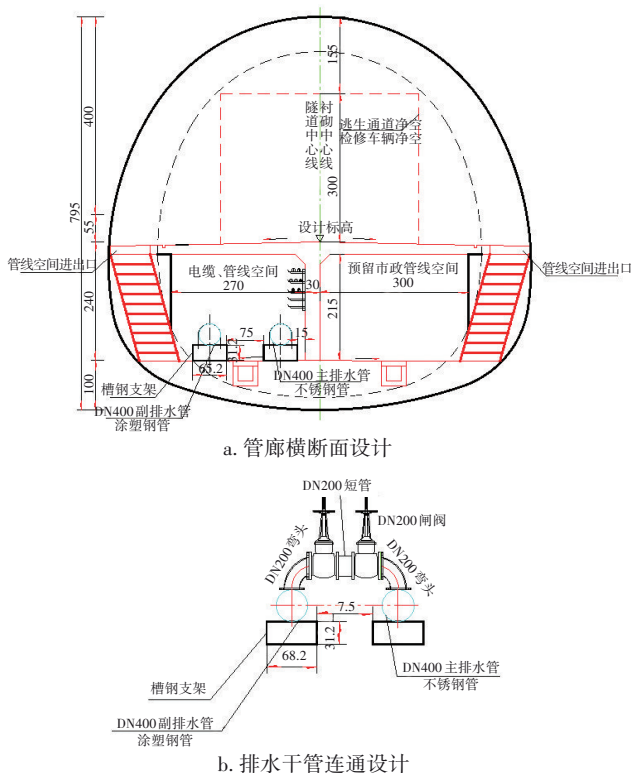


图5 服务隧道管廊排水干管设计

Fig.5 Design of the main drainage pipes in service tunnel pipe gallery

目前,国内海底交通隧道中使用的排水管道包括内外涂环氧树脂钢管、304不锈钢管、316不锈钢

管及316L不锈钢管。根据翔安隧道的运营反馈<sup>[5]</sup>,在高盐环境下304及316不锈钢管依然会被腐蚀,内外涂环氧树脂钢管反倒表现出较强的耐腐蚀性,但劣于316L不锈钢管。考虑防腐性能并兼顾经济性,该设计废水主干管采用加厚型的316L不锈钢管,备用干管为加厚型的内外涂环氧树脂钢管,平时采用主干管排水,紧急情况下可启动备用干管排水,这极大地延长了排水干管的使用寿命,保障了排水系统的安全可靠性。

结合翔安隧道的运营情况<sup>[5]</sup>,与主干管道相比,高盐环境排水系统中的闸阀、蝶阀、伸缩器等阀门附件更容易腐蚀生锈并导致渗漏水,故该设计中所有阀门附件均采用316L不锈钢材质,并对管道连接所需的法兰、短管以及螺栓等提出严格的防腐、抗拉强度要求,以提高排水系统整体的抗腐蚀能力。

### 3.5 排水系统的自动化优化设计

根据《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),排水泵站和排水管网宜采用“少人(无人)值守,远程监控”的控制模式,建立自动化系统,设置区域监控中心进行远程的运行监视、控制和管理。目前国内水下隧道排水系统在设计中大多仅采用根据水池液位控制自动启停排水泵的方案,随着水位的升高,水泵按顺序逐台启动;随着水位的降低,水泵按相反顺序逐台关闭。该设计中的排水系统除根据液位控制启停泵外,还通过监控系统的设计,将泵机的电压、电流、工频状态、开关状态、管道压力、管道流量、蓄水池液位等信息采集并上传至海沧端的隧道管理中心,并在管理中心远程控制排水泵的启停,提高了排水系统的自动化、智能化运营水平。

### 3.6 运营维护人性化设计

鉴于建设方对该隧道的安全运营要求较高,尤其是隧道的最低点废水泵房,设计应充分体现人性化理念,泵房控制室、值班室与水泵间单独设置,各排水泵房均设置休息间,内部进行地面及墙面的装饰装修,并配置空调、除湿机、无水生态移动式厕所等,尽可能地改善值班人员的工作环境。此外,水池顶部设置风管,水池进入前,先进行约0.5 h的通风换气,检测无有害气体后,才允许人员进入。

经调研,翔安隧道运营人员在检修水泵时需下到隧道最低点6 000 m<sup>3</sup>的超大水池中,工作环境极为恶劣<sup>[5]</sup>,检修时光线昏暗,池中淤泥堆积,人员在水池中站立困难,并存在溺水、触电等危险。海沧

隧道同样存在上述问题,其最低点废水泵房蓄水池的最深处约为9.2 m,为方便对长轴式深井排污泵进行检修,在废水集水池内设置316L不锈钢检修平台,该检修平台与进入废水池的钢筋混凝土检修楼梯相连接(见图6),四周均设置高1.3 m的活动式316L不锈钢护栏。当需要巡查或维修水泵时,运营管理人员无需下至废水池内,可以从服务隧道通过钢筋混凝土楼梯走到不锈钢检修平台,并自由通行至需要维护的水泵旁,降低了维护管理人员的工作难度,改善了工作环境,使用方便且安全可靠。

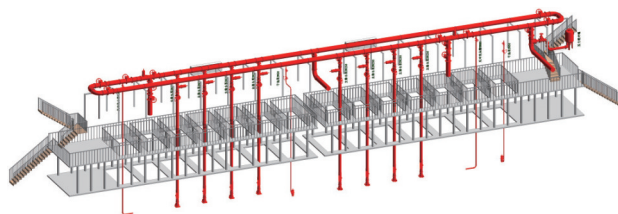


图6 不锈钢检修平台BIM设计

Fig.6 BIM design of stainless steel maintenance platform

## 4 结论与建议

① 对于矿山法海底隧道,隧道内的结构渗水与消防废水、道路冲洗水等宜采用清污分排;隧道最低点的废水池建议设计成共墙的2格水池,可围绕废水泵设计不锈钢检修平台。

② 对于长大海底隧道的最低点处废水泵房,可选择长轴式深井排污泵;隧道运营初期可采用2台临时排污泵进行排水;建议在管理中心远程控制排污泵的启停。

③ 废水泵房的出水总干管建议1用1备,可采用316L不锈钢管与内外涂环氧树脂钢管相组合的设计。

④ 排水泵房可增加休息室、空调、除湿机、无水生态移动式厕所等人性化及个性化设计。

随着物联网技术及人工智能的发展,希望未来水下隧道排水系统的设计能引入机器人巡检、机器人维护管理等人工智能技术。目前国内对于海底交通隧道内消防、排水管道的耐盐防腐技术还有待进一步研究,希望未来能生产出低成本、高耐盐的给排水管道。

### 参考文献:

- [1] 周金忠,吴文,刘彬梅. 青岛胶州湾海下城市道路隧道排水设计思路介绍[J]. 给水排水,2013,39(1):

- 49-52.
- ZHOU Jinzhong, WU Wen, LIU Binmei. Introduction of Qingdao Jiaozhou Bay urban road subsea tunnel drainage system design[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(1): 49-52 (in Chinese).
- [2] 李治国. 矿山法隧道防排水设计和施工若干问题探讨[J]. 中国建筑防水, 2020(4): 30-37.
- LI Zhiguo. Discussion on waterproofing & drainage design and construction issues for tunnels constructed by mining method[J]. China Building Waterproofing, 2020(4): 30-37 (in Chinese).
- [3] 周金忠, 贺维国, 唐健, 等. 矿山法海底交通隧道废水排水系统调研与思考[J]. 给水排水, 2018, 44(2): 30-38.
- ZHOU Jinzhong, HE Weiguo, TANG Jian, *et al.* Research and reflection on wastewater drainage system of submarine transportation tunnel in mining law [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(2): 30-38 (in Chinese).
- [4] 周金忠, 唐健, 贺维国, 等. 矿山法海底隧道废水排水系统设计实践[J]. 隧道建设, 2018, 38(10): 1698-1705.
- ZHOU Jinzhong, TANG Jian, HE Weiguo, *et al.* Design and application of wastewater drainage system in subsea tunnel constructed by mining method[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(10): 1698-1705 (in Chinese).
- [5] 吕青松, 贺维国, 方祖磊, 等. 水下长大隧道排水系统设计问题探讨[J]. 隧道建设, 2016, 36(11): 1361-1365.
- LÜ Qingsong, HE Weiguo, FANG Zulei, *et al.* Discussion on design of drainage system of long underwater tunnels[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(11): 1361-1365 (in Chinese).
- [6] 何潇剑, 李献航. 汕头苏埃湾长大海底隧道排水系统关键技术研究[J]. 给水排水, 2022, 48(1): 124-131.
- HE Xiaojian, LI Xianhang. Study on key technology of submarine long tunnel drainage system in the Su'ai Bay in Shantou [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(1): 124-131 (in Chinese).
- [7] 戴新, 贺维国, 王东伟, 等. 深埋矿山法海底隧道排水设计探讨[J]. 隧道建设, 2022, 42(4): 695-702.
- DAI Xin, HE Weiguo, WANG Dongwei, *et al.* Drainage design of a deep-buried subsea tunnel using mining method[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(4): 695-702 (in Chinese).
- [8] 戴新, 贺维国, 王东伟, 等. 珠江口铁路隧道排水系统设计研究[J]. 给水排水, 2022, 48(3): 83-97.
- DAI Xin, HE Weiguo, WANG Dongwei, *et al.* Study on drainage system design of deep buried tunnel of Pearl River Estuary Railway [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(3): 83-97 (in Chinese).

作者简介: 廖改霞(1983- ), 女, 湖北武汉人, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道消防、排水的设计及咨询审核工作。

E-mail: 31522251@qq.com

收稿日期: 2023-11-24

修回日期: 2024-03-19

(编辑: 沈靖怡、衣春敏)

强化依法治水, 携手共护母亲河