

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.16.013

# 盾构隧洞内置半埋式大直径输水钢管关键技术

张永进, 何伟

(浙江省水利水电勘测设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310002)

**摘要:** 嘉兴市域外配水工程主干线上游段需穿越杭州城区,为充分利用城市空间资源,采用了盾构隧洞内置DN3 200半埋式钢管的结构型式。输水钢管底部设置连续混凝土或水泥砂浆底座,管道底座与盾构管片间设置3道SBS油毡隔离层。隧洞内钢管连续设置,不设置伸缩节,隧洞中部钢管底座与管片之间的摩擦力约束管道通水后的温度变形,两端0~450 m范围内钢管与隧洞管片之间的轴向相对变形由设置在管道端部的伸缩节予以补偿。此种结构型式具有节约城市空间资源、环境友好的优点,隧洞内置钢管后的富余空间可以作为管道检修通道及弱电管廊使用。

**关键词:** 盾构隧洞; 内置半埋式; 输水钢管; 温度荷载

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)16-0077-06

## Key Technology of Large Diameter Built-in Semi-buried Water Supply Steel Pipe in Shield Tunnel

ZHANG Yong-jin, HE Wei

(Zhejiang Design Institute of Water Conservancy & Hydro-Electric Power Co. Ltd., Hangzhou 310002, China)

**Abstract:** The upstream trunk main section of water distribution project outside Jiaxing City needs to pass through the urban area of Hangzhou City, and the semi-buried steel pipe with nominal diameter of DN3 200 is adopted in the shield tunnel to make full use of urban space resources. A concrete or cement mortar foundation is set at the bottom of the delivery pipe, and three SBS linoleum isolation layers are set between the foundation and the shield segment. The steel pipe is installed continuously in the shield tunnel without setting expansion joint. The friction between the foundation and the pipe segment in the middle of the tunnel restricts the temperature deformation of the pipe after delivering water, and the relative axial deformation between the steel pipe and the tunnel segment within the range of 0-450 m at both ends is compensated by the expansion joint set at the end of the pipe. This type of structure has the advantages of saving urban space resources and friendly environment. The extra space in the tunnel can be used as the maintenance passage of the pipeline and the weak current utility tunnel.

**Key words:** shield tunnel; built-in semi-buried type; water supply steel pipe; temperature load

### 1 工程概况

嘉兴市域外配水工程从杭州境内引千岛湖水

至嘉兴市,设计输水能力为近期 $90 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、远期 $110 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,设计近、远期年引水量分别为 $2.3 \times$

基金项目:浙江省水利厅科技项目(RB2031、RA2011、RC2062)

$10^8$ 、 $3.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 供给嘉兴市7座水厂。输水线路采用管道压力输水, 线路总长172 km, 整体呈树状主支线布置。上游段采用盾构隧洞内置输水钢管的施工工艺, 下游段管道采用埋管、顶管、水平定向钻等施工工艺。输水线路主管直径DN1 800~DN3 200, 支管直径DN600~DN1 400。工程采用有压重力流和泵站加压混合输水方式, 沿线共设置2座加压泵站, 泵站与上下游管道直连加压, 与泵组并联设置由阀门控制的超越管, 泵站不设置进出水池。

工程上游23 km输水总管位于杭州市城区, 大型管道的路由十分缺乏, 依据“向地下空间要路由”的思路来确定路由, 根据多方协调确定管线主要沿杭州绕城、杭浦等高速绿化带布置。由于工程施工区域位于城市建成区, 规划路由已被作为市政基础设施廊道, 绿化带上部已布置有众多管线, 与高速通道交叉的市政管线密集分布、专项设施众多, 仅上游段线路就将多次穿越地铁、高铁、高压燃气管线、国防光缆等设施, 因此不具备开挖施工条件。由于顶管法要求直线布置管线, 存在工作井数量多、对周边环境的影响相对较大等问题, 经技术方案比选, 杭州城区内输水总线选择盾构隧洞内敷设输水管道的方案。盾构段总长24.2 km, 沿线共设置10座盾构井, 盾构区间长度1 870~4 150 m, D3~D4区间需穿越黄鹤山, 采用TBM掘进, 隧洞最大山体埋深为303 m, 其余洞段均采用盾构法施工。盾构隧洞高程根据穿越区地下交叉构筑物避让、高速公路扩建影响区适当加深原则确定, 隧洞埋深9.4~39.7 m。盾构隧洞内置钢管段设计最大内水压力1.1 MPa, 下游埋管段设计最大内水压力0.8 MPa。

## 2 隧洞内置半埋式输水钢管设计

以线路较曲折的D2~D3区间(见图1)为例, 区间长度2 852 m, 线路沿绕城高速南侧布置, 设置两座深度分别为28、21 m的盾构始发井及接收井。考虑到杭州绕城高速拓宽改造空间需要、避开规划设施和现状房屋, 盾构隧洞平面上以圆弧、直线段以及缓和曲线连接布置, 圆弧最小转弯半径287 m, 最大转弯半径1 500 m。盾构隧洞距离现状房屋最小净距为5 m, 距离高速最小净距为14 m。盾构隧洞区间土层分布从上到下为: ②<sub>1</sub>层粉质黏土、③<sub>2</sub>层淤泥质粉质黏土(或淤泥质黏土)、④<sub>1</sub>层粉质黏土(或黏土)、④<sub>2</sub>层粉质黏土与粉土互层、⑥<sub>1</sub>层粉质黏土

(或淤泥质粉质黏土)、⑦层黏土(或粉质黏土)、⑧<sub>1</sub>层含砂粉质黏土、⑧<sub>4</sub>层含泥粉细砂(al-mQ<sub>3</sub>)。其中④<sub>1</sub>粉质黏土(或黏土)层和⑦层黏土(或粉质黏土)土层为可塑~硬塑性土, 中等压缩性, 土体渗透系数均小于 $8.84 \times 10^{-5} \text{ m/d}$ , 下卧土层不存在承压水层, 盾构隧洞布置在这2层土中, 隧道顶部埋深11~14 m。

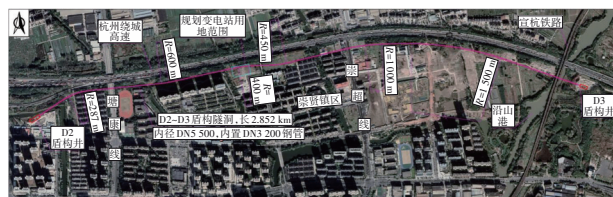


图1 D2~D3盾构隧洞区间平面布置

Fig.1 Plane layout of D2-D3 shield tunnel section

输水线路沿线的盾构井施工完成后改建为永久性的工作井, 井内设置DN3 200检修蝶阀、DN3 200套筒式伸缩节、管道检修排水、隧洞渗漏排水等附属设施, 同时, 工作井作为进入盾构区间维护输水管道的通道。为满足地下空间的通风需求, 盾构井(见图2)内设置空气通风系统。

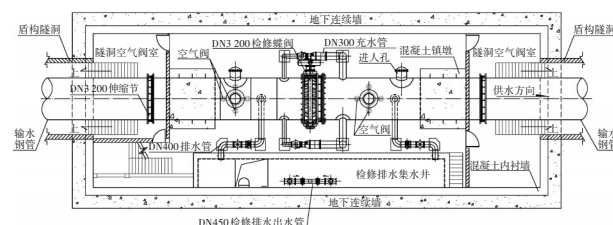


图2 盾构井典型布置示意

Fig.2 Typical layout of shield shaft

根据国内已建盾构隧洞内衬钢管的工程经验<sup>[1-2]</sup>, 钢管与隧洞之间设置自密实混凝土充填, 并设置排水过渡层。嘉兴市域外配水工程输水钢管管径为DN3 200, 考虑钢管与隧道之间400 mm的回填混凝土空间, 盾构隧洞内径最小可取4.0 m, 该直径盾构工程中应用很少, 需个性化设计和采购盾构机, 在投资及工期上均没有优势。考虑到杭州市及周边城市地铁隧道的通用尺寸为衬后内径5.5 m, 选择该类标准盾构隧洞可利用现有的掘进机及管片生产设施, 在工期及费效比上具有明显优势; 同时, 本工程输水线路在杭州市区内布置, 盾构隧洞较大, 可以充分利用其地下空间, 发挥地下管廊的综合作用, 实现输水管道敷设兼顾地下强弱电通道的功能。因此最终确定选用盾构隧洞外径为6.2 m, 管片厚度350 mm, 衬后内径5.5 m, 内设一根

DN3 200 输水钢管。输水钢管按光面管承受1个大气负压时抗外压稳定要求,钢管壁厚取28 mm,其中考虑2 mm的腐蚀厚度。钢管承受最大工作内水压力为1.1 MPa(考虑管道内压、钢管承受温度变化、轴线方向不均匀沉降等因素)。经计算,钢管在不利工况下最大拉应力为126.6 MPa,考虑到城区内高压水管爆管造成次生灾害的严重性,钢管钢材选用提高一级,采用Q345钢材。钢管连续敷设,隧洞内不设置伸缩节。钢管底部135°范围与盾构管片之间设置混凝土基座,基座混凝土在洞轴线方向设置伸缩缝,钢管与混凝土基座之间设锚固型钢紧密连接,提高基础混凝土与钢管的整体性;混凝土基座和隧洞管片之间设油毡隔离层,以减少管道轴线方向的摩擦力荷载对盾构管片的影响,保证管片间柔性接头的安全。盾构隧洞内置钢管建成实景见图3,盾构隧洞及管道结构剖面布置见图4。



图3 盾构隧洞内置钢管建成实景

Fig.3 Shield tunnel with built-in semi-buried steel pipe

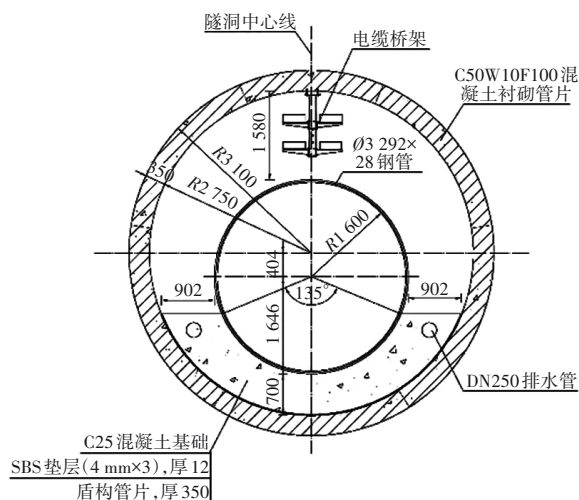


图4 盾构隧洞及管道结构剖面图

Fig.4 Shield tunnel and pipeline structure section

### 3 关键技术处理

#### 3.1 管道支撑结构型式选择

隧洞明铺管道常用支墩式,按隧洞内明管设计,这对中小直径管道是适用的,结构受力明晰。但对于本工程DN3 200钢管,若采用支墩结构,支墩间距取15 m,单支墩荷载达1 850 kN,软土中的盾构管片承受如此大的集中荷载将导致管片结构受损。从受力均衡角度,对于盾构隧洞内大型输水钢管,应选择连续支座敷设的结构型式。

在隧洞底部135°范围设置管道混凝土底座,钢管及水体荷载沿隧洞轴线方向均匀分布,运行期均布线荷载为197 kN/m,作用于隧洞下方约1/3周长范围内,根据结构分析,软土内盾构隧洞结构可以承受上述荷载。

为加快施工效率,在隧洞内钢管安装就位后,自密实混凝土或自流砂浆底座由内向外连续浇筑。为满足长距离泵送的要求,在距隧洞口400 m范围内底座采用C25自密实混凝土,400 m距离以外采用M15中粗粒径自流水泥砂浆,本项目最远泵送距离达1 480 m。自密实混凝土及自流水泥砂浆均采用满足长距离泵送的配合比设计,在浇筑过程中施工人员可进入浇筑工作面进行平仓作业,在浇筑后及时覆盖及喷淋养护以保证浇筑质量。

#### 3.2 混凝土底座防裂

为防止管道混凝土或砂浆底座出现裂缝,按间距6 m设置变形缝,缝间设置20 mm厚的浸沥青松木板分隔,为满足快速施工要求,全线的分隔板在混凝土或砂浆浇筑前全部安装完毕,实现底座连续浇筑。为减少隧洞管片对钢管底座的约束作用,在底座与管片之间设置3层SBS油毡隔离层,总厚度为12 mm。通过以上措施,混凝土及砂浆底座整体性良好,沿线底座未出现结构性裂缝,有效保证了钢管底部外包混凝土(砂浆)的完整性,提高了钢管外防腐的耐久性。

#### 3.3 管道温度变形及盾构结构受力

为避免在隧洞有限空间内维护、更换管道伸缩节,隧道内钢管不设置伸缩节。在隧洞内连续敷设长距离输水钢管时,需要考虑在输送水温变化工况下管道变形及其对盾构管片结构的影响。

杭州市地下20 m左右地温一般维持在19~22℃<sup>[3]</sup>,受地温影响,盾构隧洞温度总体稳定。隧洞



内管道温度主要受输送水温控制,本工程输送原水为千岛湖深层水,水温10~15℃;根据监测,由于水泥水化热、钢管焊接放热等因素,施工期隧洞内钢管温度在25~35℃区间。因此,初次通水时管道设计温降按15~25℃考虑。

温度变化时钢管将产生变形,若钢管的变形不受约束,长度2 800 m的钢管在温降20℃情况下将缩短0.67 m,钢管两端的伸缩节无法适应如此大的变形,因此需要通过管道与盾构管片之间的摩擦来约束钢管的部分变形。

温度变化时,在变形方向完全约束的情况下,钢管将受到的轴向应力可按公式 $\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta t$ 计算,式中, $\sigma$ 为钢管由于温度变化产生的轴向应力,钢管弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ , $\Delta t$ 为温度变化值。在钢管温降20℃情况下,若钢管与管片之间无滑移,则钢管轴向产生50.16 MPa的拉应力,远小于钢材的抗拉强度。因此,利用钢管底座及管片的摩擦力来约束钢管的温度变形是可行的。

盾构隧洞轴线方向利用螺栓连接,对轴向受力比较敏感。为减少钢管及混凝土底座对盾构管片受力的影响,在钢管底座底部设3层SBS油毡隔离层与盾构管片隔离,设置SBS油毡隔离层后钢管混凝土底座与盾构管片之间摩擦力与相对变形之间呈现双线性关系分布,模型见图5。在相对位移小于 $\Delta$ (初始滑移位移)时,摩擦力为线性弹性,其单位长度的刚度为 $K_1$ , $K_1 = \frac{\mu F_n}{\Delta}$ 。当相对错动位移大于 $\Delta$ (初始滑移位移)时,内外管间摩擦力为 $\mu F_n$ 。根据试验结果, $\Delta = 1 \sim 1.5 \text{ mm}$ , $\mu = 0.2 \sim 0.3$ ,SBS层数越多 $\Delta$ 值越大、摩擦系数 $\mu$ 值越小。

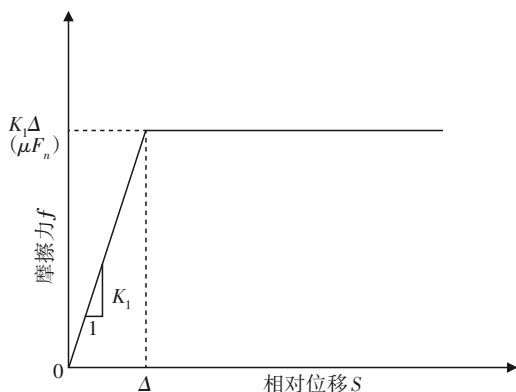


图5 摩擦力双线性模型

Fig.5 Bilinear model of friction

将内置钢管与外部盾构隧洞分别按线单元进行简化建模,内钢管与盾构隧洞之间、盾构隧洞与外部土体之间各自用三向弹簧模拟相互作用<sup>[4]</sup>,水温度变化荷载施加在钢管线单元上,通过数值模拟分析钢管与盾构管片之间的相互作用力与相对位移。

以D2~D3区间线路为例,钢管底座与管片之间摩擦初始位移、摩擦系数分别取 $\Delta = 1 \text{ mm}$ 、 $\mu = 0.25$ ,在管道初次通水温降20℃荷载下,经有限元模拟计算,钢管及外衬盾构隧洞轴力沿轴线方向分布见图6,钢管与外衬盾构隧洞之间的相对位移分布见图7。

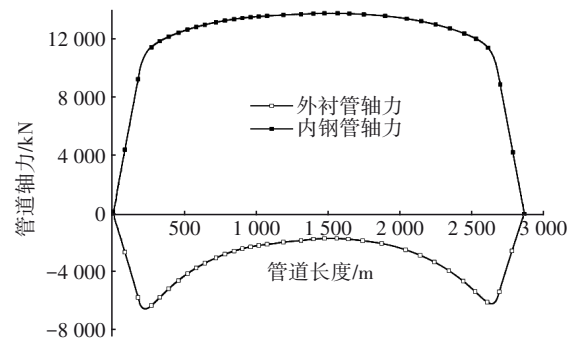


图6 钢管及盾构隧洞轴力分布

Fig.6 Distribution of axial force between steel pipe and shield tunnel

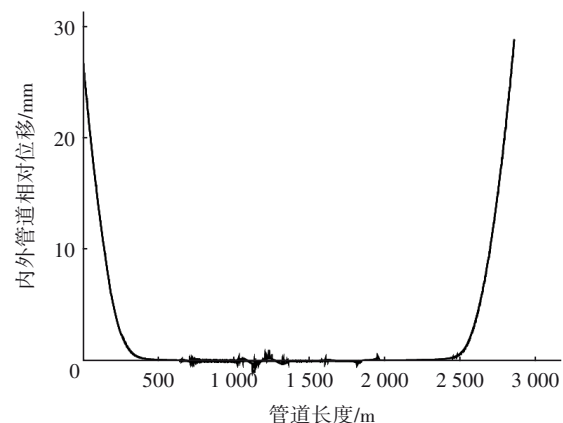


图7 钢管与盾构隧洞相对位移分布

Fig.7 Distribution of relative displacement between steel pipe and shield tunnel

由图6可知,隧洞两端0~450 m范围内钢管轴力逐渐加大至最大值12 500 kN左右,将隧洞内部钢管轴力平缓增加至最大值13 900 kN。由于钢管温降收缩,外衬隧洞承受轴向压力,最大值-6 500 kN发生在两端250~300 m位置,隧洞中部所受轴力相

对较小,仅为-2 000 kN左右。总体来说,钢管收缩轴力大于盾构隧洞所受轴力,主要是因为盾构隧洞外围受到土体摩擦力的缘故,该摩擦力抵消了部分钢管收缩轴力,从而使隧洞轴力减小。根据上述轴力分析,受温降影响钢管轴向最大拉应力为49.4 MPa,组合水压力等荷载,钢管组合应力为126.6 MPa,钢管应力在安全的范围内;隧洞管片轴向压应力为1.08 MPa,远小于管片C50混凝土的抗压强度。

由图7可知,钢管两端相对于盾构隧洞收缩量分别为27.5、30.1 mm,相对位移发生在隧洞两端0~450 m范围内,中部管道与隧洞之间几乎无轴向相对位移,管道温降变形由管道与盾构隧洞之间的摩擦力完全约束。根据工程运行后10座盾构井内的管道端部伸缩节变形监测结果,其变形量均在35~50 mm,本段计算值略小于实测值,主要原因为计算时外衬隧洞与盾构井之间的刚性约束没有考虑,隧洞的压缩变形抵消了钢管与隧洞之间的部分相对位移。钢管变形的计算值及实测值均小于伸缩节设计允许变形极值150 mm,钢管的温度变形在安全允许范围内。

### 3.4 钢管防腐

在良好的钢管表面处理及工厂化加工条件下,熔结环氧可以作为大型管道防腐的良好材料,已被大量工程应用,具有较好的耐久性<sup>[5-6]</sup>。本案例钢管位于地下隧洞内,可避免紫外线的影响,熔结环氧的耐久性及施工便利性较环氧煤沥青、环氧玻璃鳞片等材料具有十分明显的优势。经比较,外防护设计采用400 μm的熔结环氧粉末涂层,在工厂内喷涂成形。钢管上部225°范围表面外露,具备后期防腐维修的条件,熔结环氧防腐修复较为方便;管道下部135°范围内钢管通过焊接锚固型钢与底座牢固粘结,该范围内钢管外表面不具备二次修补的条件,采用熔结环氧防护结合外包混凝土(或砂浆)的碱性环境防腐保护<sup>[7]</sup>,可以满足钢管在合理使用年限内安全运行的要求。

钢管混凝土底座按6 m间距设置宽20 mm的变形缝,为不削弱变形缝处钢管外防腐的效果,在变形缝处设置抗老化橡胶片跨缝粘贴在钢管的外部,以隔绝钢管外表面与水、空气的接触,保障熔结环氧防腐的耐久性。

底座变形缝跨缝结构见图8。

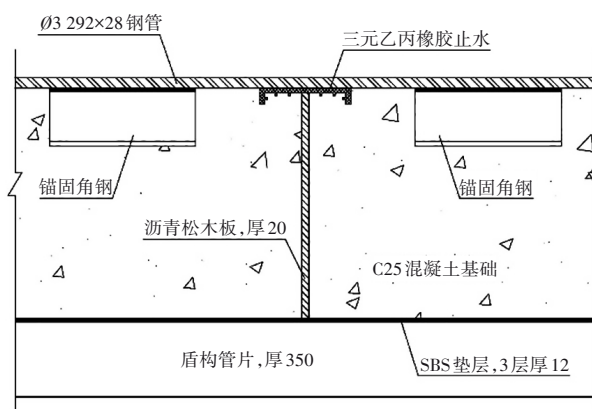


图8 钢管底座变形缝结构

Fig.8 Structural drawing of deformation joint of steel pipe foundation

DN3 200钢管内部输送优质千岛湖原水,采用重力自流输水,系统水头较为富余,管道使用寿命要求为100年,为单管输水,停水检修时间很短,钢管内防腐的耐久性为首要考虑因素。水泥砂浆为无机材料防腐,耐久性明显优于其他高分子材料,造价较熔结环氧粉末防腐节省约30%,管道内径3 200 mm,水泥砂浆防腐施工便利,且可连续施工。基于管道防腐材料的耐久性、经济性及实施便利性考虑,选用水泥砂浆防腐,防腐厚度为18 mm。长钢管内部水泥砂浆防腐在钢管焊接安置完毕后随即开展内部除锈施工,为减少钢管底座混凝土凝固水化热对内部水泥砂浆防腐层养护效果的影响,在底座浇筑完成7~10 d后开始相应管段内部的水泥砂浆喷涂施工。

### 3.5 空间综合利用

城市地下空间十分宝贵,因此,盾构隧洞与内置钢管之间的空间除作为管道检修维护通道外,利用其顶部净高约1.6 m的空间架设弱电桥架,除满足工程自身配电、通信敷线的需求外,还考虑作为城市通信干线的路由通道,兼具综合管廊的功能。

为满足人员进入隧洞内的通风要求,在隧洞两端的盾构井内分别设置压风室和抽风室,分别设置送风、排风风机,利用隧洞内空间作为气流输送通道,按1 h换气2~3次设置通风量<sup>[8]</sup>,隧洞区间内设置三处气体监测点(监测氧气、一氧化碳、甲烷、硫化氢)。为便于日常监控,隧洞内设置了视频监控系统及钢管渗漏监测系统,满足工程远程监控的要求。

## 4 结论

结合盾构隧洞内连续敷设大型输水钢管技术

在嘉兴市域外配水工程中的成功应用,结论如下:

① 在建设空间受限、管道路由资源十分紧张的城市建设区建设大型输水管道,采用深埋盾构隧洞内置半埋式输水钢管的结构型式具有节约城市空间资源、环境友好的优点,具有广阔的应用推广价值。

② 在盾构隧洞内置半埋式敷设大直径输水钢管可以使盾构管片均匀承受管道及水体的重力荷载,管道底座设置必要的变形缝以防裂,底座可采用长距离泵送自密实混凝土或自流中粗砂水泥砂浆连续浇筑。

③ 盾构内置半埋式长距离敷设钢管不需在中部设伸缩节,可以利用管道与盾构管片之间的摩擦约束钢管的大部分温度变形,中部管道与隧洞管片之间无滑移,管道两端存在一定长度滑移管段。

④ 盾构隧洞内置钢管后的富余空间可作为管道运维检修通道、城市弱电管廊使用。

#### 参考文献:

- [1] 温晓英,程子悦,李琛,等. 西江引水工程盾构输水隧洞衬砌形式的选择与设计[J]. 中国给水排水, 2012, 28(10):1-4.  
WEN Xiaoying, CHENG Ziyue, LI Chen, *et al.* Selection and design of shield tunnel lining in Guangzhou Xijiang water diversion project [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28 (10) : 1-4 (in Chinese).
- [2] 黄井武,严振瑞,李代茂,等. 高内压盾构隧洞原位试验及衬砌变形行为研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3):165-172.  
HUANG Jingwu, YAN Zhenrui, LI Daimao, *et al.* In-situ experimental study on deformation behaviors of lining structure for shield tunnels under high internal pressure [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(3): 165-172(in Chinese).
- [3] 秦祥熙,林清龙,李少华. 杭州市浅层地温资源温度场特征[J]. 太阳能学报, 2017, 38(3):833-837.  
QIN Xiangxi, LIN Qinglong, LI Shaohua. Characteristics of geotemperature field for shallow geothermal energy assessment & utilization in Hangzhou [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38 (3) : 833-837 (in Chinese).
- [4] 杨成永,马文辉,费腾,等. 考虑轴力和剪切效应的盾构隧道纵向变形分析[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(1):139-147.  
YANG Chengyong, MA Wenhui, FEI Teng, *et al.* Analysis of longitudinal deformation of shield tunnel structures with consideration of axial force and shear effect [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57 (1): 139-147(in Chinese).
- [5] 师立功. 管道用熔结环氧粉末涂层长效防腐的关键[J]. 涂料工业, 2017, 47(2):73-80.  
SHI Ligong. Key points in long-lasting anticorrosion of fusion-bonded epoxy for pipeline [J]. Paint & Coatings Industry, 2017, 47(2): 73-80(in Chinese).
- [6] 李东阳,潘腾,赵一桦,等. 管道熔结环氧粉末涂料质量控制研究[J]. 涂料工业, 2021, 51(7):54-59, 69.  
LI Dongyang, PAN Teng, ZHAO Yihua, *et al.* Study on quality control of fusion bonded epoxy powder coating for pipeline [J]. Paint & Coatings Industry, 2021, 51 (7) : 54-59, 69(in Chinese).
- [7] 高阳,王天稳,王曦明. 钢材在碱性条件下腐蚀性能的试验研究[J]. 钢结构, 2011, 26(3):68-72.  
GAO Yang, WANG Tianwen, WANG Ximing. Study on corrosive performance of steel under alkaline environment [J]. Steel Construction, 2011, 26 (3) : 68-72(in Chinese).
- [8] 全德海. 城市综合管廊正常通风的探讨[J]. 暖通空调, 2019, 49(10):51-55.  
QUAN Dehai. Discussion on normal ventilation of urban utility tunnel [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2019, 49(10): 51-55(in Chinese).

**作者简介:**张永进(1972-),男,安徽黄山人,工学硕士,正高级工程师,副总经理,主要从事水利水电工程设计及研究工作,曾获水利部科技进步二等奖、浙江省水利科技进步特等奖、国家优秀工程设计铜质奖、浙江省优秀勘测设计一等奖。

**E-mail:**zyj7208@mail.zdwp.net

**收稿日期:**2022-06-02

**修回日期:**2022-07-09

(编辑:孔红春)