高水压地层顶管出洞止水环漏浆处理技术研究

熊 亮
(中国水利水电第五工程局有限公司第三工程公司,四川 成都 610066)

摘 要:在长距离顶管施工过程中,始发洞门可能因长期受地下水压过高、钢套环承压变形、止水胶圈长期受拉应力而失效等原因出现洞门漏浆、漏水问题,从而造成顶力陡增现象,随着顶进距离的不断增加,会出现顶不动的严重后果。为了解决高水压地层顶管出洞洞门止水环漏浆这一技术难题,笔者依托内蒙古引绰济辽工程实例分析了洞门止水环漏浆原因,介绍了一种高水压地层条件下顶管始发洞门止水环漏浆处理方法及关键技术,为类似工程提供借鉴。

关键词:高水压;顶管;出洞;止水环;漏浆处理
中图分类号:TV640.34 **文献标志码**: B **文章编号**:1001-2184(2024)02-0111-05

Study on Slurry Leakage Treatment Technology for Water Stop Ring of the Outlet of Pipe Jacking in High Water Pressure Formation

XIONG Liang
(The Third Branch, Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd. Chengdu Sichuan 610066)

Abstract: In the long-distance pipe jacking construction process, the problem of slurry leakage and water leakage may occur in the starting outlet due to the over-high groundwater pressure, the deformation of steel ring under pressure, and failure of the sealing rubber under the long-term tensile stress, resulting in a sudden increase in the jacking force. As the jacking distance continues to increase, there will be a serious consequence of immobility. In order to solve the technical problem of slurry leakage of the water stop ring of the of the outlet of pipe jacking in high water pressure formation, the paper analyzes the causes of slurry leakage based on the example of the Diversion Project from Inner Mongolia to Liaoning, and introduces a treatment method and key technology for slurry leakage of water stop ring at the starting of pipe jacking under the condition of high water pressure formation, which provides reference for similar projects.

Keywords: High water pressure; Pipe jacking; Outlet; Water stop ring; Slurry leakage treatment

0 引 言

顶管法以其施工工期短、噪音小以及不影响地面交通等优势,在中国得到了飞速的发展,广泛应用于市政隧道工程,并在近些年中,逐渐运用于水利工程[1]。在整个顶管工程中,管道出洞时的封堵工艺是非常关键的施工环节,因为,该环节施工质量的优劣直接影响到顶管在后续顶进过程中洞门止水环是否会出现漏浆现象。洞门漏浆将会使润滑泥浆套失效,顶管摩阻力增加,对顶管工程施工造成严重影响,往往需要采取措施对洞门止水环漏浆、漏水问题进行处理。

现有关于顶管洞门止水环漏浆处理方面的研究较少。王志刚[2]以上海市黄浦江上游水源地连通管工程为背景,对大直径钢顶管工程中的洞门渗漏水原因进行分析,通过在洞门止水钢环上加设一道橡胶板并临时压注聚氨酯,顺利解决洞门渗漏水问题,控制了工程风险;卢光鑫[3]结合工程实例,分析了超深覆土顶管井穿墙套管渗漏的原因,并在应用中刚(柔)性和蠕变性防水层结合的方式进行防渗处理,达到理想的防水效果;王翔宇[4]以港珠澳大桥珠海连接线拱北隧道工程为例,对顶管施工所采用的出洞止水装置和套管接收装置进行了室内密封试验,并将该装置应用到实际工程中用以解决顶管出洞洞门渗水问题;杨明勇等[5]以马来西亚吉隆坡市市政管网系统改造和新建工程实例,对顶管出洞洞门防渗抗水进行了分析,通过在顶管出洞口安装出口器的形式,在

收稿日期:2023-10-31

密封胶圈止水的基础上,再次形成止水圈,确保顶管出洞顺利进行。

上述洞门止水环漏浆、漏水处理措施对于地下高水压地质,不一定能达到预期效果,如果一旦密封失效,不仅耽误顶管施工工期,还有可能发生润滑泥浆失效顶力过大、顶进失败、涌水淹没始发井等次生灾害,甚至危及井下施工人员的生命安全。因此,笔者结合引绰济辽蛟流河顶管工程对高水压地层顶管出洞止水环漏浆处理施工进行研究和介绍。

1　工程概述

引绰济辽工程是国务院确定的"十三五"期间实施的 172 项节水供水重大水利工程之一,也是内蒙古自治区迄今为止最大的水利工程,设计最大年调水量为 4.88×10^8 m^3,由文得根水利枢纽和输水工程组成。其中蛟流河穿河建筑物是输水工程穿越蛟流河的交叉建筑物,连接 5 号隧洞和 6 号隧洞,直线布置,由东北向西南走向,长度 1 115.00 m。主要由始发井、顶管段、无压洞钻爆段等组成,其中顶管始发井结构总深度为 24.72 m,衬砌后直径为 13.00 m;顶管段单次顶进 946.50 m,采用外径 4 300.00 mm 钢筋混凝土管节施工,纵断面比降为 1/1 100,采用中国首台自主研发带独立人舱系统 ZTPϕ4 400.00 mm 泥水平衡式顶管机进行施工。

工程穿越地质条件主要为泥砾、砂砾、强风化及中风化凝灰岩地层,岩芯多呈碎块状,地下水埋深约 2.00 m,最大水压 0.22 MPa,该段透水率 $q=2.3\sim65.0$ Lu,属于弱透水～中等透水岩体。

2　漏浆分析

2.1　问题描述

顶管在顶进过程中始发洞门出现止水胶圈破损失效、持续漏浆、漏水的现象,顶管出洞洞门止水失效漏水见图 1,根据对试验管顶进时的轴向应变分析,判断洞门漏浆漏水对顶进力的影响较大。考虑到顶管始发洞门附近地质条件复杂,顶管机在贯通之前不能以常规的施工方法处理洞门止水问题,须针对埋深大、水压高、管径大等特点综合考虑洞门处理措施,确保工程顺利推进。

2.2　轴向应变分析

根据对顶管试验管轴向应变进行统计分析,

图 1　顶管出洞洞门止水失效漏水

发现 2022 年 8 月 25 日下午开始采集数据后,顶进时管节轴向压应变逐渐减小,该年 8 月 31 日凌晨 1 点左右压应变随后出现明显降低。根据顶进情况记录,此时试验管监测断面距离始发井洞门 51.00 m,可见顶管始发井洞门至顶进方向前 51.00 m 处有较大的摩阻力。根据应力计算结果反馈,该段摩阻力为 11 045 kN,传递至监测断面后剩余顶力为 10 941 kN。即前 51.00 m 单位摩阻力为 216 kN/m。试验管轴向应变情况图见图 2。

根据《给水排水工程顶管技术规程》CECS 246－2008[6] 每米管壁摩阻力按下式计算:

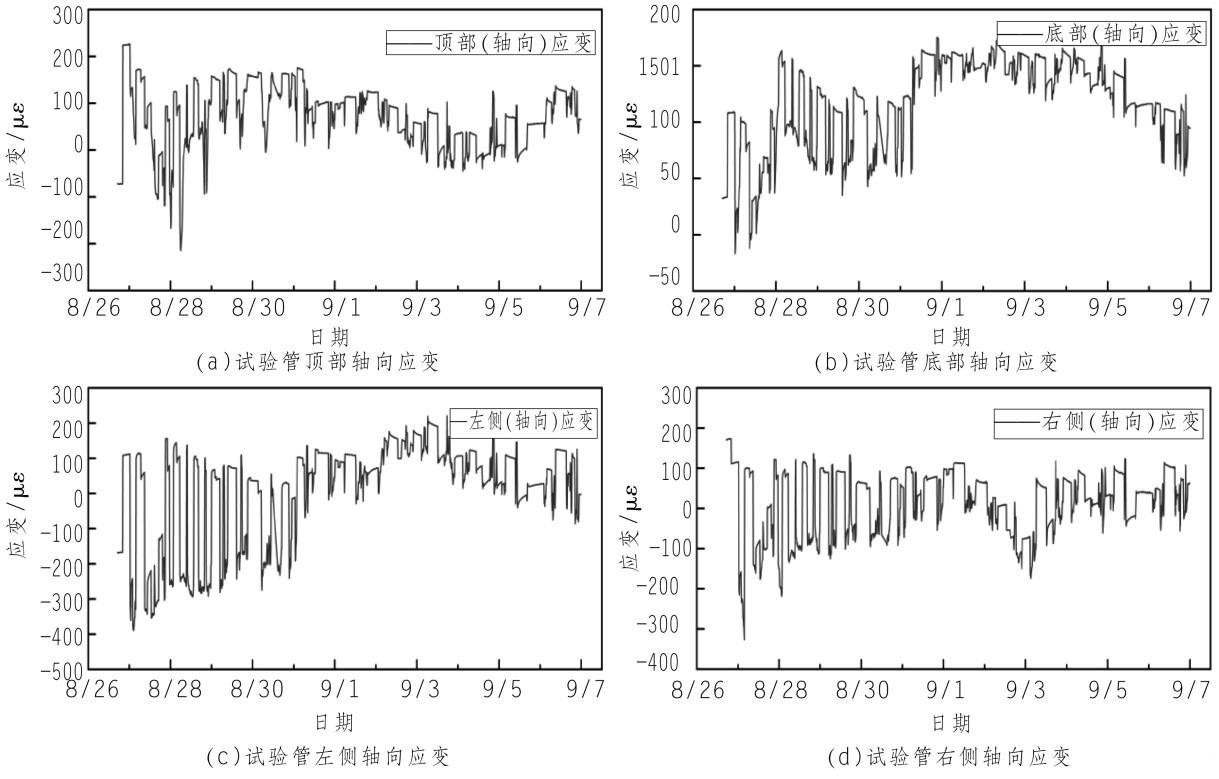
$$F=\pi D_1 f_s \tag{1}$$

式中:F 为管壁每延长米的摩阻力,kN;D_1 为管壁外径,4.3 m;f_s 为管壁单位摩阻力,通过注浆减阻后摩阻力取 7 kN/m^2。经计算,管壁每延米的摩阻力为 95 kN/m。

可以发现,顶管始发洞门漏浆严重影响顶管靠近洞门 50.00 m 范围内的摩阻力,是顶进力出现增加并且靠近洞门位置摩阻力增大的主要原因,推测是由于洞门漏水现象严重,导致环空润滑浆液无法保留形成完整泥浆套;另外,顶管洞门 50.00 m 左右正处于软硬交接位置,存在水流通道,有大量泥沙和岩屑随着水流不断涌入环空间隙,进而导致顶进力逐步增加,摩阻力持续增加。

2.3　漏浆原因分析

(1)顶管始发前,在安装钢套环后,未预压钢套管,直接浇筑洞门混凝土。致使在顶进一段时间后,止水钢套环与混凝土产生形变差,在套管与混凝土间形成空隙,最终形成渗漏通道。



(a)试验管顶部轴向应变　(b)试验管底部轴向应变

(c)试验管左侧轴向应变　(d)试验管右侧轴向应变

图 2　试验管轴向应变情况

(2)顶管机出洞后,长期受地下超高水压力影响,止水胶圈翻转或撕裂,从而失效导致漏浆。

(3)由于该工程顶管距离较长,止水胶圈由于不断与管节摩擦,导致局部磨损破裂或撕裂造成密封止水失效。

(4)该顶管机刀盘直径 4.40 m,较管节外径大 10.00 mm,顶进过程容易沉渣,随着进排浆压力、管外壁注浆等,沉渣被挤压最终有碎石沉滞在止水胶圈内,造成底部止水胶圈磨损撕裂而失效。

(5)在施工过程,可能由于施工工人不当操作或其他原因,出现可能的出洞止水失效。

3　工艺选择

常用的顶管出洞口止水环漏浆处理措施有注浆止水、密封装置止水、二次施作止水装置等。

(1)注浆阻水是指将油脂、浓泥浆、聚氨酯等阻水材料通过注浆管注入地层之中,利用阻水材料与水的不兼容性进行阻水,从而达到防渗的目的。该方法工期短,效果好,但造价高,且恢复顶进后维持时间不长。

(2)密封装置止水是加工一套由管道系统、反力系统、注浆系统和加压系统组成的装置,在止水环外侧安装该装置后,通过往装置中注入泥浆进行密封。该装置施工工期较长,且在螺栓孔连接处密封效果一般。

(3)二次施作止水装置是在失效的止水环基础上,优选含纤维钢丝的止水胶圈与钢套环及洞门混凝土共同形成整套止水装置。该方法施工简便、安全、防渗效果好、耐久性强。

综合现场具体情况考虑,该工程拟采用二次施作止水装置对顶管洞门漏浆进行处理。

4　处理方案

4.1　工艺流程

洞门漏浆处理施工流程主要包括以下几项工作内容:

准备工作→降水井施工→浓泥浆配比→注浆阻水→二次制安钢套环→二次制安止水胶圈→二次浇筑洞门混凝土→结束。

4.2　准备工作

顶管洞门漏浆施工准备工作主要包括人员、设备、材料及技术保障等方面。施工前做好原材料及设备进场准备工作,组织作业人员进行技术交底,并做好进洞洞门两侧降水井测量放线工作。

4.3　降水井施工

因顶管始发井位于蛟流河漫滩,地下水丰富,且上部软土层主要为级配不良砾及泥砾,为确保二次施作止水装置顺利进行,拟采用管井降水将顶管出洞口附近地下水位降低,为注浆阻水施工创造有利条件。

距顶管两侧 5.00 m、沿顶管顶进方向纵向间距 5.00 m 分别布置降水管井,共布置 4 口降水管井,单口管井直径 219.00 mm,单井深 23.50 m(至顶管底部高程以下 2.00 m)。实际施工时可根据降水效果适时增加管井数量。在注浆阻水施工前 7～10 天开始采用 11 kW 高压深井泵进行抽水。

4.4　浓泥浆配比

由于洞门漏水严重,如不短时间阻水,无法进行止水胶圈的更换。根据方案技术思路,采用浓泥浆对洞口附近管节进行加注用以阻水,确保洞门不再漏水,便于二次施工止水洞门,因此须优选浓泥浆配比。首先需对顶管洞门50m范围内注入浓泥浆进行阻水,避免处理过程中大量泥水涌入始发井形成隐患。现场浓泥浆试验见图 3,浓泥浆配比试验见表 1。

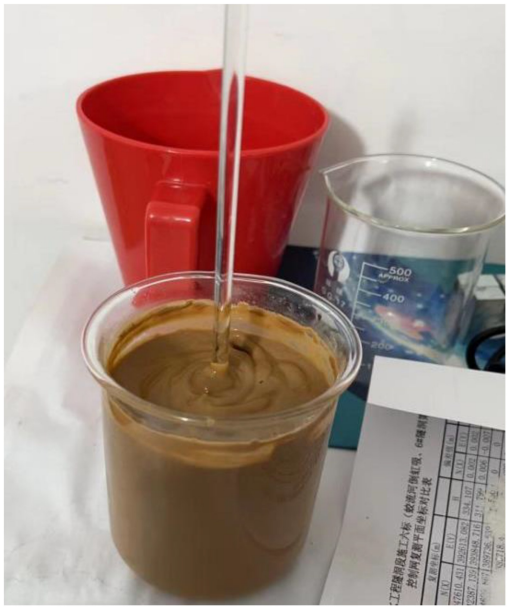


图 3　现场浓泥浆试验

表 1　浓泥浆配比试验

编号	加量			结果		
	膨润土 /%	纯碱 /%	CMC /%	粘度 /s	密度/(g·ml^{-1})	滤失量/(ml/30 min)
1	12	0.1	0.1	210	1.09	8.0
2	12	0	0.2	212	1.09	7.8
3	15	0.1	0.1	300	1.10	7.7
4	15	0.1	0.2	/	1.10	6.4
5	20	0.1	0.1	/	1.11	5.2

经泥浆配比实验分析,选择泥浆配方:膨润土:CMC(高粘)=12%:0.15%。即 1 m^3 清水中加入 120 kg 膨润土、2 kg CMC。泥浆粘度 212 s,滤失量 7.8 ml/30min。

4.5　注浆阻水

由于洞门止水橡胶密封已经损毁失效,在此情况下再注入浓泥不一定可以达到最佳效果,现场施工时应从洞门钢套环内预留的 DN50 孔上注入浓泥浆。

注入方式:先将洞门钢套环上预留的 A1、A2 打开,从 A2 口往两道橡胶密封之间注入,注至 A1 口有浓泥冒出时,即可停止注入,后续每隔段时间进行补注,直至顶管始发洞门短时间内不再漏浆、漏水即止,随即进行洞门止水处理施工。

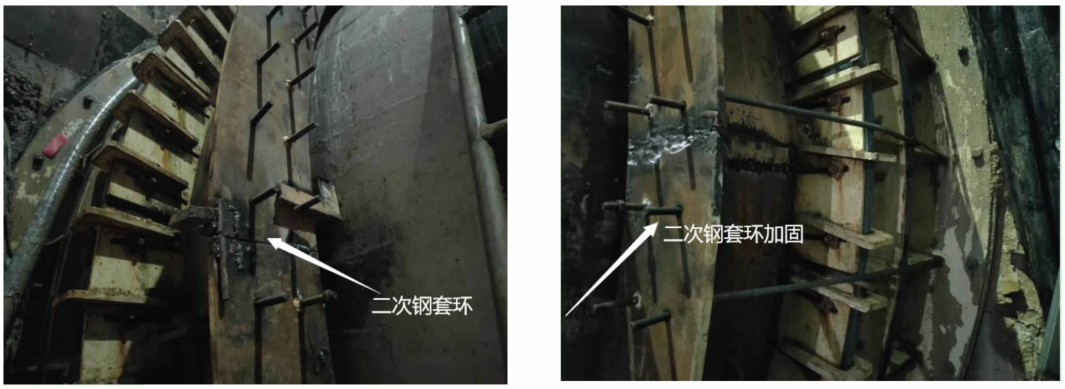
4.6　二次制安钢套环

因该工程原设计洞门止水环失效,故需在原止水环基础上二次施作钢套环。钢套环采用 2 cm 厚 Q235B 钢板加工成型,外径为 4.9 m,长 0.6 m,按左、右两块分别进行安装、焊接,环向间距 20 cm 预埋两根止水胶圈加固螺栓。二次制安钢套环见图 4。

4.7　二次制安止水胶圈

为避免止水胶圈受高水压及管节顶进拉裂破损,优选含纤维钢丝的止水橡胶(抗拉强度 14 MPa,邵氏硬度 65～70°),厚 2 cm,紧贴钢套环布置,采用 18 mm 厚钢压板进行加固。在止水胶圈安装前,应在管节与钢套环间隙内填充棉被进行堵塞,防止顶进时泥浆流失。二次制安止水胶圈见图 5。

4.8　二次浇筑洞门混凝土



(a)二次钢套环安装　　(b)二次钢套环加固

图 4　二次制安钢套环

图 5　二次制安止水胶圈

钢套环及止水胶圈安装完成后，沿钢套环外侧安装 Φ16@200 钢筋网；采用 1 cm 厚木模板进行施工，模板内侧采用拉模筋进行加固，拉模筋间距 1 m 布置，模板外侧采用钢管进行斜撑，确保模板施工质量满足要求。

钢筋、模板制安完成并经验收合格后，进行 C30 混凝土浇筑施工，混凝土中添加抗冻、抗渗外加剂。采用 6 m^3 搅拌罐车进行水平运输，车载泵进行混凝土输送。混凝土采用溜槽加串筒结合的方式入仓，沿井壁加固溜筒。混凝土按左右两侧对称、均匀、分层的原则进行入仓，防止爆模。人工平仓振捣密实，防止产生蜂窝、麻面现象。浇筑完成后，按要求进行现场养护。二次洞门施工平面布置图见图 6，二次洞门施工立面图见图 7。

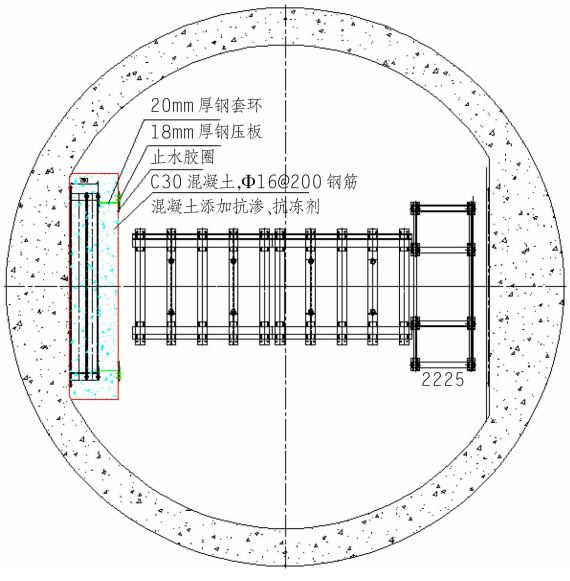


图 6　二次洞门施工平面布置图

5　结　论

引绰济辽蛟流河无压洞顶管工程通过采用井点降水、优化泥浆配比、注浆阻水、二次施作洞门止水结构等一系列处理方法，保障了顶管出洞洞门整体稳定性和密闭性，使得洞门漏浆、漏水问题得到有效解决。通过过程中对关键技术进行研究和实施，得到以下结论：

（下转第 127 页）

工大学出版社，2008.
[4] FATHI-MOGHADAM M，KIANI S，ASIABAN P et al. Modeling of Perforated Sill-Controlled Hydraulic Jump[J]. International Journal of Civil Engineering，2017，15(4)：689-695.
[5] HAGER W. H，LI D. Sill-controlled energy dissipator[J]. Journal of Hydraulic Research，1992，30(2)：165-181.
[6] DEBABECHE M，ACHOUR B. Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel/ Effet du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire[J]. Journal of Hydraulic Research，2007，45(1)：135-139.
[7] OHTSU I，YASUDA Y，YAMANAKA Y. Drag on vertical sill of forced jump[J]. Journal of Hydraulic Research，1991，29(1)：29-47.
[8] PAGLIARA S，PERUGINELLI A. Limiting and Sill-Controlled Adverse-Slope Hydraulic Jump[J]. Journal of Hydraulic Engineering，2000，126(11)：847-851.
[9] OMID M. H，GORD-NOSHAHRI A，KOUCHAKZADEH S. Sill-controlled hydraulic jump in a gradually expanding channel[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management，2010，163(10)：515-522.
[10] ACHOUR B，DE CONFÉRENCE M，DEBABECHE M. Ressaut contrôlé par seuil dans un canal profilé en U Control of hydraulic jump by sill in a U-shaped channel[J]. Journal of Hydraulic Research，2003，41(1)：97-103.
[11] 肖兴斌. 底流水跃消能在工程中的应用与发展述评[J]. 人民珠江，1991(3)：22-27.
[12] OHTSU I，YASUDA Y. Transition from supercritical to subcritical flow at an abrupt drop[J]. Journal of Hydraulic Research，1991，29(3)：309-328.
[13] HAGER W H，BRETZ N V. Hydraulic jumps at positive and negative steps[J]. Journal of Hydraulic Research，1986，24(4)：237-253.
[14] HAGER W. H. B - Jumps at Abrupt Channel Drops[J]. Journal of Hydraulic Engineering，1985，111(5)：861-866.
[15] MOSSA M，PETRILLO A，CHANSON H. Tailwater level effects on flow conditions at an abrupt drop Effet de la hauteur d'eau avale sur le ressaut hydraulique au dessus d'une marche[J]. Journal of Hydraulic Research，2002，40(4)：13.

作者简介：
郭川靖(1999-)，女，山西忻州人，硕士研究生，研究方向为水力学及河流动力学；
蒋　雷(1991-)，男，四川成都人，博士研究生，研究方向为水力学及河流动力学；
刁明军(1968-)，男，四川简阳人，博士，研究方向为水力学及河流动力学.

(编辑：廖益斌)

(上接第 115 页)

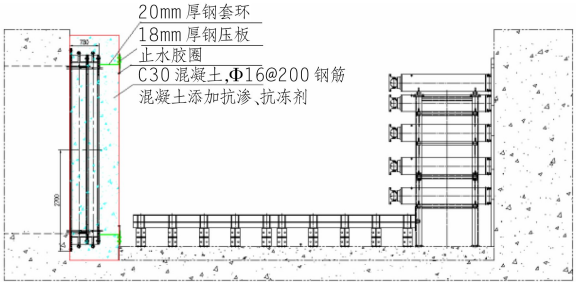


图 7　二次洞门施工立面图

(1)顶管进出洞洞门施工时，应采取洞门加固措施，确保顶管顺利推进；必要时可提前在洞门钢套环处预埋注浆管路，便于施工期渗漏处理。

(2)顶管施工和盾构施工的区别在于顶管管节跟随顶管机动态移动[7]，管节移动过程中容易与止水胶圈摩擦发生破损撕裂现象，故在顶管进出洞洞门止水材料选择时，优先配置双道含纤维钢丝橡胶止水片或其他抗拉性能较好的止水材料。

(3)在判断泥浆向顶管出洞口方向流失后，可以优化顶管洞口段润滑泥浆配比，使用高浓度、低滤失量的泥浆，并利用管壁润滑泥浆的注入对环空间隙进行封堵，必要时可注入泥浆、油脂等混合液，可以有效的减少地下水对润滑浆液造成的损失。

参考文献：

[1] 王雪，王成虎，马孝春，等. 国内外顶管施工技术的对比分析[J]. 施工技术，2017，46(增刊 2)：1018-1023.
[2] 王志刚. 大直径钢顶管洞门渗漏水原因分析及处理措施[J]. 工程建设，2019，57(7)：48-51.
[3] 卢光鑫. 超深覆土顶管井穿墙套管渗漏处理[J]. 城市建设理论研究，2013，3(24)：326-329.
[4] 王翔宇. 适用于高水压的顶管进出洞止水装置研究[J]. 非开挖技术，2015，18(2)：82-85.
[5] 杨明勇，孙前金. 顶管工程施工中的止水于防渗漏技术[J]. 安徽建筑，2018，45(3)：172-175.
[6] 葛春辉，王承德，余彬泉，等. 给水排水工程顶管技术规程[M]. 北京：中国计划出版社，2008.
[7] 强健. 暗挖综合管廊的发展和研究方向[J]. 隧道建设(中英文)，2021，41(5)：764-771.

作者简介：
熊　亮(1989-)，男，四川成都人，项目总工程师，工学士，从事水利水电工程施工技术与管理工作.

(编辑：廖益斌)