

中俄东线输气管道穿越长江高水压盾构隧道接缝防水组合形式研究

马本特¹, 王岳², 孙鹏³, 郭英杰^{4,5*}, 谢祝祝⁶, 薛飞⁷

¹中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营

²国家管网集团建设项目管理分公司, 河北 廊坊

³山东莱克工程设计有限公司, 山东 东营

⁴同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海

⁵同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海

⁶国家石油天然气管网集团有限公司工程部, 北京

⁷中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2022年6月2日; 录用日期: 2022年8月18日; 发布日期: 2022年8月25日

摘要

为了解决穿越长江高水压输气管道盾构隧道接缝的防水问题, 本文详细分析了中俄东线输气管道穿越长江段盾构工程概况, 本项目控制段盾构隧道的水头高度达到74 m, 属于小直径盾构隧道工程的高值。本文确定了在管片内外双侧各设置一道三元乙丙弹性密封垫的防水组合形式方案, 并在充分考虑设计使用年限、温度影响、安全系数等因素的基础上, 确定了该项目三元乙丙弹性密封垫的防水能力指标。本文介绍了利用ABAQUS对三元乙丙弹性密封垫防水能力展开预测的数值模拟方法, 包括材料本构、数值模型、计算过程、结果分析等; 对内外侧三元乙丙弹性密封垫开展了防水性能试验, 试验结果表明该防水组合形式方案达到防水能力设计指标, 满足工程要求。

关键词

盾构隧道, 管片接缝, 密封垫, 防水性能

Study on Joint Waterproof Combination of High Water Pressure Shield Tunnels of China-Russian East Line Gas Pipeline Crossing the Yangtze River

Bente Ma¹, Yue Wang², Peng Sun³, Yingjie Guo^{4,5*}, Zhuzhu Xie⁶, Fei Xue⁷

¹Sinopec Petroleum Engineering Co., Ltd., Dongying Shandong

*通讯作者。

文章引用: 马本特, 王岳, 孙鹏, 郭英杰, 谢祝祝, 薛飞. 中俄东线输气管道穿越长江高水压盾构隧道接缝防水组合形式研究[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(8): 1158-1167. DOI: 10.12677/ag.2022.128112

²National Pipeline Group Construction Project Management Branch, Langfang Hebei

³Shandong Lake Engineering Design Co., Ltd., Dongying Shandong

⁴Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

⁵Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai

⁶Department of Engineering, State Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Beijing

⁷China Petroleum Natural Gas Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

Received: Jun. 2nd, 2022; accepted: Aug. 18th, 2022; published: Aug. 25th, 2022

Abstract

In order to solve the waterproof problem of joints of the shield tunnel of the high water pressure gas pipeline crossing the Yangtze River, this paper analyzes the general situation of the shield tunnel project of the China-Russia east line gas pipeline crossing the Yangtze River in detail. The head height of the shield tunnel in the control section of the project reaches 74 m, which is the high value of small-diameter shield tunnel projects. In this paper, a waterproof combination scheme of setting an EPDM elastic seal cushion on both inside and outside of the segment is determined. Waterproof ability index of the EPDM elastic seal cushion is determined on the basis of fully considering the design service life, temperature influence, safety factor and other factors. This paper introduces the numerical simulation method of predicting the waterproof ability of the EPDM elastic gasket by ABAQUS, including material constitutive, numerical model, calculation process, result analysis, etc. The waterproof performance tests are carried out on the inner and outer EPDM elastic gaskets. The test results show that the waterproof combination scheme reaches the design index of waterproof ability and meets the engineering requirements.

Keywords

Shield Tunnel, Tunnel Joint, Seal Gasket, Waterproof Performance

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中俄东线输气管道在江苏省南通市经济技术开发区与江苏省常熟市经济技术开发区穿越长江, 是中俄东线的控制性工程。管道相继穿越新江海河、常熟港海轮锚地、主航道、专用航道、白茆河及其之间区域, 穿越大致呈南北向, 穿越北岸竖井呈长方形, 属于始发井, 穿越南岸竖井呈圆形, 属于接收井, 穿越长度约为 10.23 km, 穿越水面宽度约为 7.5 km。具体穿越位置及周边环境详见图 1。

穿越方式为盾构隧道穿越方式, 隧道工程采用盾构法施工, 隧道外径 7.6 m, 隧道内径 6.8 m, 管片厚度 0.4 m, 环宽 1.5 m, 环向分块采用 5 + 1, 采用通用楔形环方式, 错台拼装, 弯螺栓连接。隧道穿越区段盾构隧道的水头高度达到 74 m, 最深处理论水压值约 0.74 MPa, 隧道内运营温度约为 20℃。盾构管片接缝处采用三元乙丙弹性密封垫作为接缝防水材料, 盾构机拼装力为 90 kN/m。根据工程项目背景, 本项目是目前国内小直径盾构隧道水压的高值, 对隧道结构的防水提出了很高的要求。



Figure 1. Schematic diagram of the location and surrounding environment of crossing the Yangtze River
图 1. 穿越长江位置及周边环境示意图

盾构隧道渗漏水的位置主要是盾尾与管片接触处、管片的接缝、注浆孔以及管片自身的小裂缝等，其中管片接缝防水是其重点[1] [2] [3] [4] [5]。管片接缝的防水的主要对策是使用密封材料。本文将通过接缝防水研究，解决该项目防水难题，提出防水形式及密封垫断面形式及技术要求，并通过试验验证选取的密封结构的性能。

2. 接缝防水组合形式方案

2.1. 双道三元乙丙橡胶密封垫接缝防水方案

对于盾构隧道接缝防水，我国现在的使用趋势是把遇水膨胀橡胶和普通非膨胀橡胶密封垫结合起来使用，采用多孔、特殊断面弹性橡胶密封垫和遇水膨胀橡胶复合方式，通过嵌入或者是模压的方式方法将水膨胀橡胶与非膨胀橡胶结合构成复合型弹性橡胶密封垫[6] [7] [8] [9]。这样，弹性橡胶密封垫拥有了弹性止水、膨胀止水双重功效，使得弹性橡胶密封垫即使在管片之间产生较大接缝张开量，依靠橡胶回弹无法完全止水(包括长期压缩下的密封垫应力松弛)的情况下，膨胀橡胶遇水产生体积膨胀，达到止水的目的。这样一来，盾构隧道短期的防水靠密封垫压密解决，而长期防水依靠水膨胀橡胶的水膨胀性，尤其是限制侧向膨胀，靠高度方向的单向膨胀予以解决。

在高压条件下，隧道采用单道或者双道密封垫进行防水，采用单道防水时，一般采用三元乙丙橡胶密封垫作为防水措施，保证其具有较高的防水能力及耐久性能，保证在短期长期均具有防水能力。双道防水通常采用一道三元乙丙橡胶密封垫加一道遇水膨胀橡胶密封垫或者两道三元乙丙橡胶密封垫分别在管片内外侧共同防水[10] [11] [12]。考虑到本项目盾构隧道控制段水压较高，采用内外设置两道三元乙丙橡胶密封垫的接缝防水组合方案，可以有效的增加防水的可靠性，减少漏水产生的可能性，双道密封垫防水布置形式如图 2 所示。

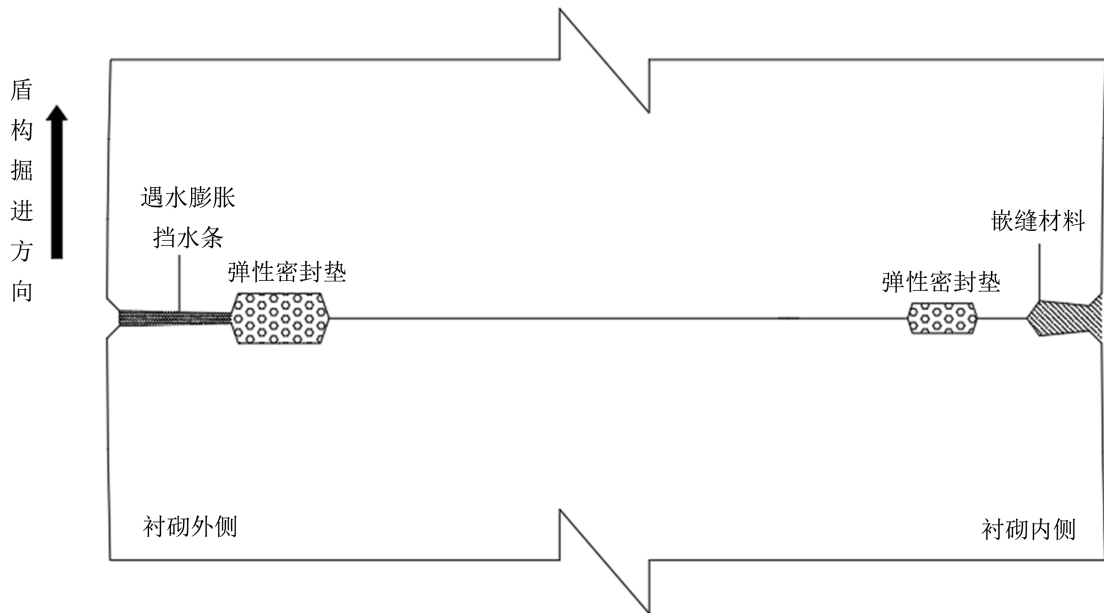


Figure 2. Waterproof layout scheme for segment joints of shield tunnel crossing Yangtze River high water pressure gas transmission pipeline

图 2. 穿越长江高压输气管道盾构隧道管片接缝防水布置方案

2.2. 双道密封垫接缝防水设计指标

出于尽量减少沟槽对混凝土管片损伤及双道密封垫装配力限值的考虑，为了保证外道密封垫在拼装力受限制下仍有较高的防水能力[13] [14] [15]，即盾构机拼装力主要用于压缩外道密封垫，内道三元乙丙橡胶密封垫拼装力不能大。内外双道密封垫接缝防水设计指标具体如下：

2.2.1. 外道密封垫接缝防水设计指标

- 1) 盾构外侧理论水压值：0.74 MPa；
- 2) 设计使用年限：100 年，为长期性地下建筑；
- 3) 在 100 年使用过程中防水材料性能的衰减情况：环境温度按 23℃ 计算，按照橡胶老化性能预测公式，三元乙丙橡胶 100 年以后的压缩应力保持率为 0.59 (59%)；
- 4) 安全系数：国际上一般考虑为 1.2~1.4，高压水一般取 1.2，本项目安全系数定为 1.2；
- 5) 外道极限工况考虑张开量 6 mm，错台量 15 mm。

按照以上因素计算防水材料(短期)防水能力指标：

外道(短期)防水能力指标 = (理论水压值 × 安全系数) / 压缩应力保持率 = $(0.74 \text{ MPa} \times 1.2) / 0.59 = 1.5 \text{ MPa}$

2.2.2. 内道密封垫接缝防水设计指标

本文针对内道的防水能力，不考虑安全系数、密封垫老化等因素进行额外限制，而是要求内道密封垫能够满足一定的短期防水能力，对突破外道密封垫的渗漏水起到一定的防水与渗漏水阻渗作用，即考虑第二道密封垫作为辅助防水措施。

2.3. 内外侧沟槽与密封垫断面形式

根据项目组已有相似工程经验与前期研究，确定本项目内外两侧沟槽与密封垫断面形式如图 3 和图 4 所示，并作为后续数值模拟与试验研究的确定断面。

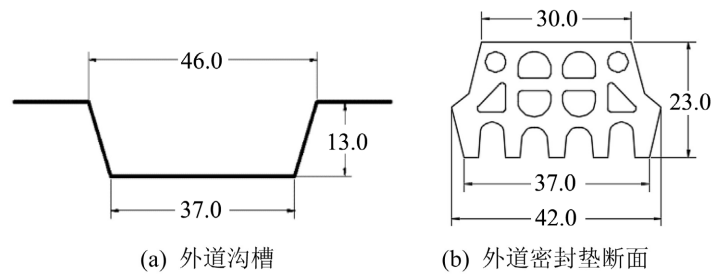


Figure 3. Outer waterproof combination form (unit: mm)
图 3. 外道防水组合形式(单位: mm)

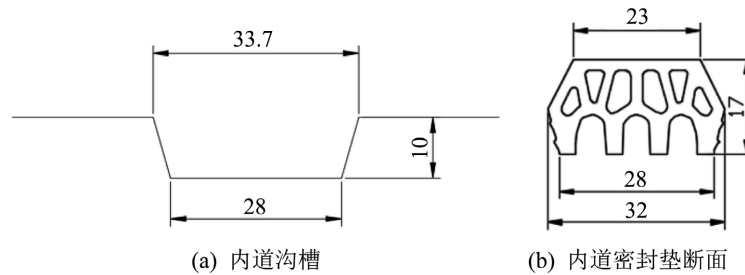


Figure 4. Inner waterproof combination form (unit: mm)
图 4. 内道防水组合形式(单位: mm)

3. 密封垫防水能力预测数值模拟方法

3.1. 密封垫数值计算模型

本文采用有限元软件 ABAQUS 对密封垫的防水能力开展数值模拟分析, 按照既有研究成果[16], 数值模型中橡胶密封垫统一为 EPDM 材料, 选取超弹性模型, 应变位能模型采用 Mooney-Rivlin 模型, 如式(1)所示。

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) \tag{1}$$

其中, W 为应变能函数, 是关于变形张量不变量 I_1, I_2 的函数, C_{10} 和 C_{01} 为相关的两个主要参数。本文中橡胶密封垫硬度为邵氏 65 度, 在本文的计算中均采用相应的材料参数进行弹性密封垫的数值模拟。

数值计算时可根据不同断面及工况分别建立无错台、双边错台模型, 施加竖向位移, 模拟管片拼装过程中的密封垫压缩过程, 图 5 为外道密封垫数值模拟压缩过程示意图。

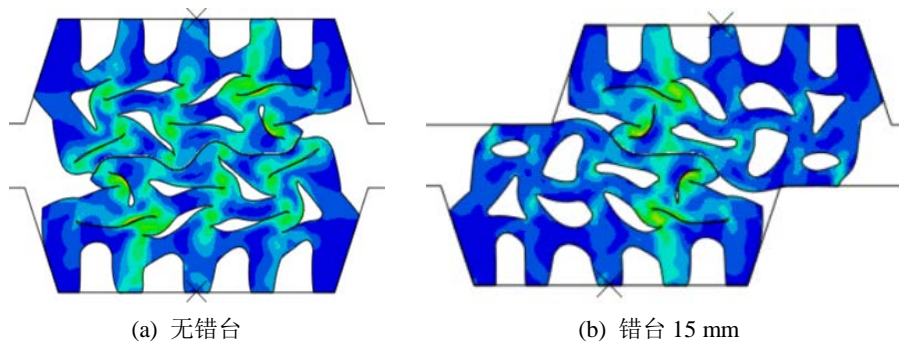


Figure 5. Schematic diagram of numerical simulation compression process of outer channel gasket (unit: MPa)
图 5. 外道密封垫数值模拟压缩过程示意(单位: MPa)

3.2. 数值结果分析

三元乙丙橡胶密封垫在极限工况下，即张开量与错台量均达到控制指标量时，其耐水压值达到最低值，因此在数值模拟计算时，可直接分析三元乙丙橡胶密封垫在极限工况(本文即张开 6 mm、错台 15 mm)下的防水能力。

三元乙丙橡胶密封垫的耐水压值与接触面之间的接触压力有很大的关系，因此出于计算精度与时间成本的综合考虑，本文通过对上下两密封垫接触面表面接触压力的分布来预测其耐水压值。

外道密封垫的表面接触应力如图 6 所示，在张开 6 mm 错台 15 mm 时，密封垫表面接触应力满足 1.5 MPa 的防水设计指标。

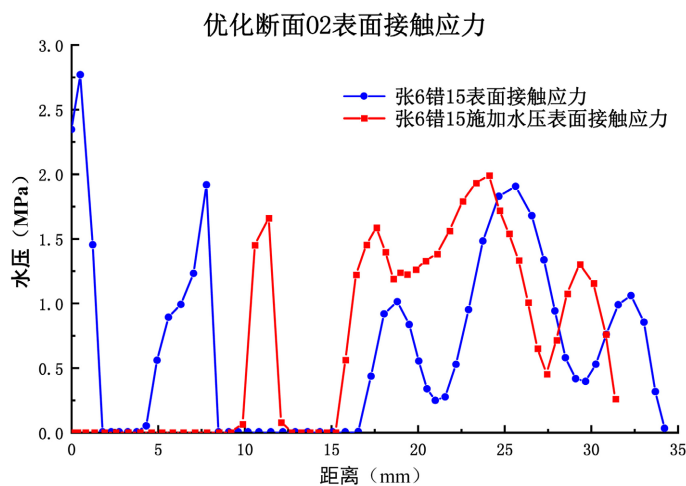


Figure 6. Numerical simulation results of contact pressure on the surface of outer channel gasket (hardness 65, opening 6 mm, staggered seam 15 mm)

图 6. 外道密封垫表面接触压力数值模拟结果(硬度 65，张开 6 mm，错缝 15 mm)

内道密封垫的表面接触应力如图 7 所示，在张开 6 mm 错台 15 mm 时，密封垫表面接触应力可以满足 0.6 MPa 的防水要求。

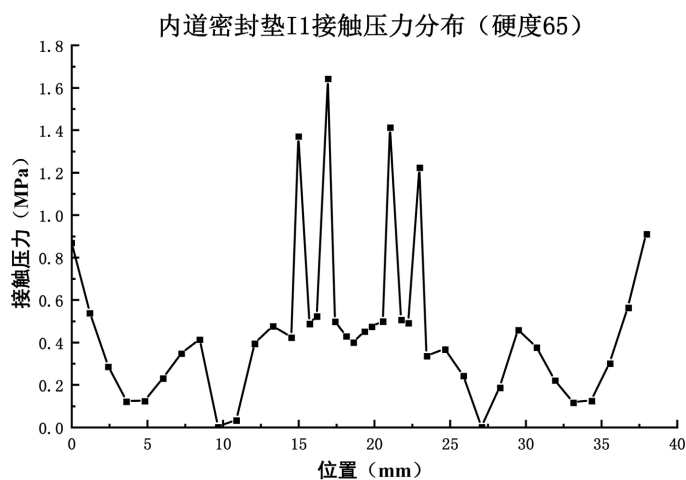


Figure 7. Numerical simulation results of contact pressure on the surface of inner seal gasket (hardness 65, opening 6 mm, staggered seam 15 mm)

图 7. 内道密封垫表面接触压力数值模拟结果(硬度 65，张开 6 mm，错缝 15 mm)

4. 密封垫防水性能试验

4.1. 密封垫防水性能试验系统

防水性能试验依托基于同济大学自主研发的三向加载设备 GPJ-3900，通过浇筑与实际管片沟槽一致的混凝土构件，利用水压加载装置施加水压，开展不同张开量、错台量下的防水性能试验[1] [9]，防水性能试验系统如图 8 所示。系统由主加载框架、电液伺服加载作动器、试样座、试样装配与纵向加载装置和 POP-M 工控 PC 电液伺服多通道控制器组成，通过加载系统实现不同张开量、错台量下的防水试验工况。水压加载装置通过水管连接混凝土构件上预留的注水孔，利用水压自动控制装置控制水泵施加水压，试验时通过控制水压加载系统，实现分级加载。

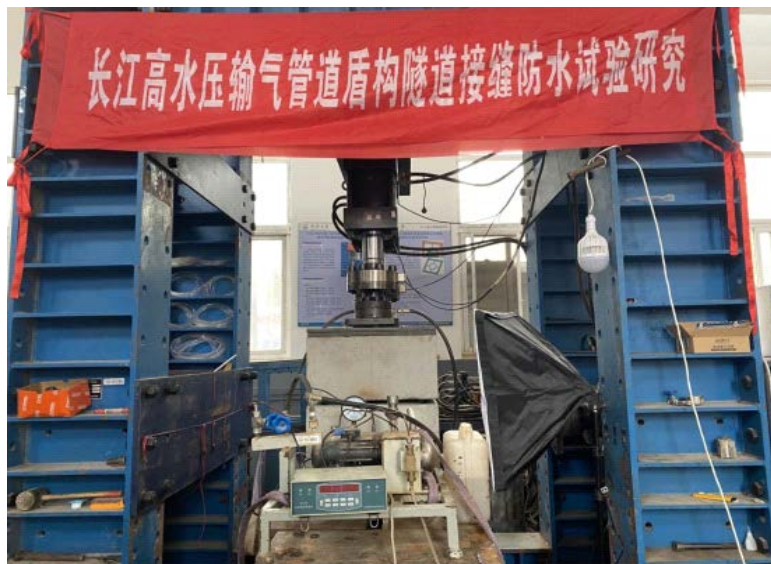


Figure 8. Waterproof performance test system of joint gasket of shield tunnel for gas transmission pipeline
图 8. 输气管道盾构隧道接缝密封垫防水性能试验系统

4.2. 密封垫防水性能试验流程

密封垫防水性能试验流程如下：

- ①将防水构件下半块吊装至试件运送机的支座上，在构件沟槽内部涂抹防水胶，然后粘贴弹性密封垫；
- ②在防水构件上半块沟槽内涂抹防水胶并粘贴弹性密封垫，然后吊装至试件运送机上与下半块构件对准叠合，设置初始错台量；
- ③将试件运送机推入加载框架内，并将试件调整至合适位置放置；
- ④施加一定的垂向力，使弹性密封垫具有一定的初始压缩量(密封性)，保证向试件内部注入水时不会立刻发生渗漏；
- ⑤通过注水管道向试件内部注水，使之充满整个试件内部空间；
- ⑥在上半块试件出水口安装水压表并密封；
- ⑦加载系统通过位移控制方式使弹性密封垫压缩至设定的压缩量，通过水压加载装置逐级向内部空腔施加水压，每一级加载后稳压几分钟，同时观察密封垫渗漏情况，直到弹性密封垫发生渗漏，记录弹性密封垫的压缩量和渗漏水压力；

⑧本级试验完成后，打开阀门，卸载水压，然后继续加载使弹性密封垫达到下级压缩量，再通过注水部分加压至渗漏，如此往复得到弹性密封垫不同压缩量下的防水压力。

在密封垫防水试验技术中，为保证试验结果正确，试验密封垫需紧密粘贴在试件槽中，基于既有文献的总结，在预制完成的试件沟槽内、密封垫圈底部涂抹盾构隧道接缝密封垫专用胶水，胶水涂抹之后需晾干一定时间，然后再将密封垫粘贴至沟槽内，并通过逐次锤击及重物预压，保证密封垫与沟槽粘贴紧密，放置至少 24 小时，直到胶水彻底凝固后，即可将上、下混凝土构件拼装完成，吊装至试验仪器加载位置。

密封垫防水性能试验部分流程如图 9 所示。

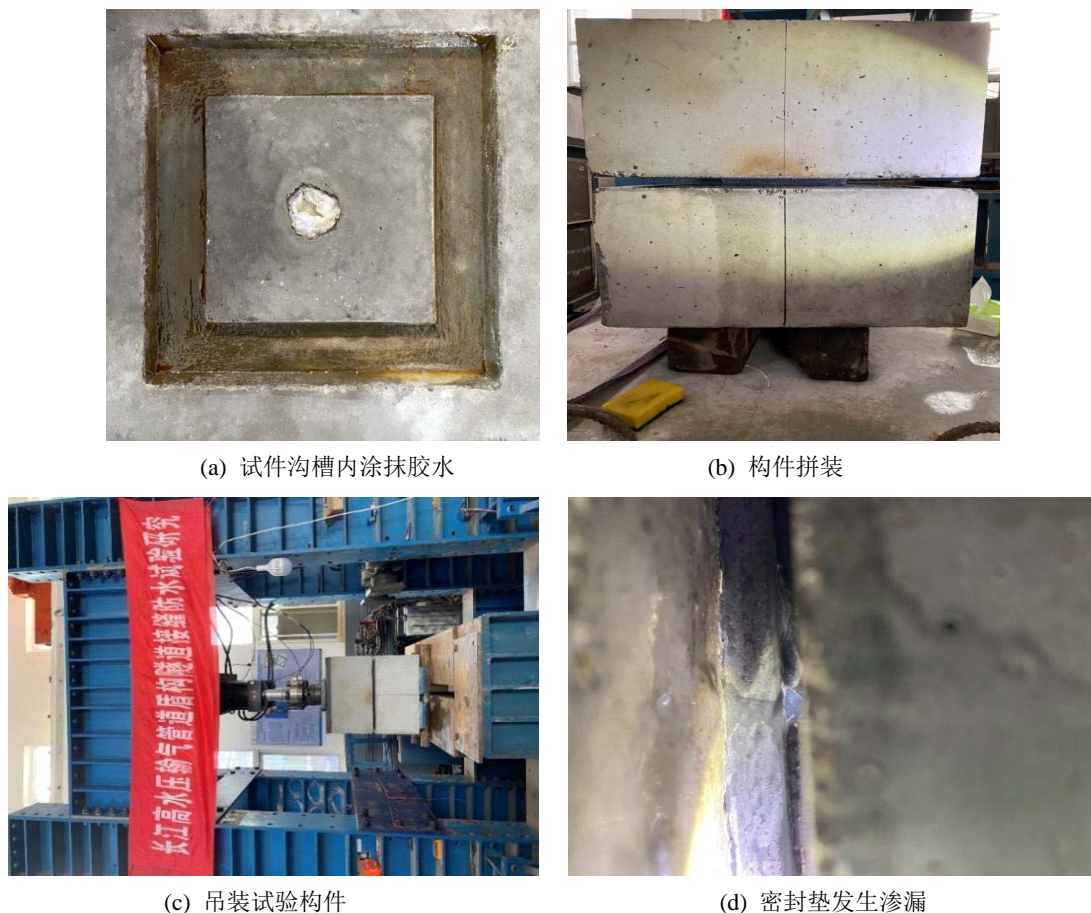


Figure 9. Partial flow of waterproof performance test of sealing gasket
图 9. 密封垫防水性能试验部分流程

4.3. 防水试验结果分析

针对外道密封垫断面，开展了错台 15 mm 不同张开量工况下的防水性能试验，得到渗漏水压力值与接缝张开量的关系如图 10 所示，根据防水性能试验结果，外道密封垫断面在错台 10 mm 的工况下，随着密封垫的压密，即接缝张开量的减小，密封垫的防水性能逐渐提高，在接缝张开量 7.2 mm、错台量 15 mm 时的防水压力已经达到 1.5 MPa，在接缝张开量 6 mm、错台量 15 mm 时的防水压力已经超过 1.5 MPa，满足本项目对于外道密封垫防水性能的要求。另外，数值模拟计算结果与试验数据基本一致，试验验证了数值模型的准确性。

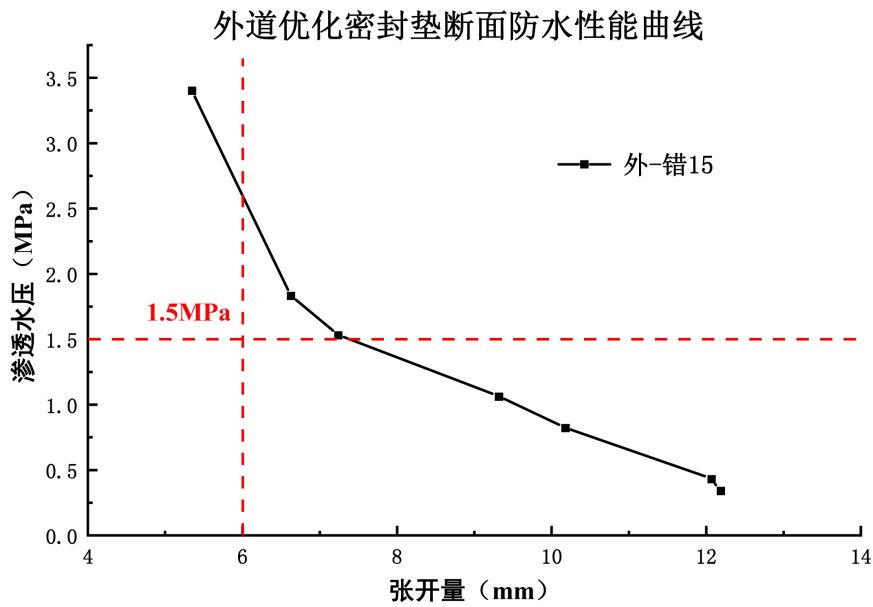


Figure 10. Water pressure resistance curve of waterproof test under 15 mm staggered platform condition of outer road section

图 10. 外道断面错台 15 mm 工况下防水试验耐水压曲线

针对内道密封垫断面,开展了错台 15 mm 不同张开量工况下的防水性能试验,得到渗漏水压值与接缝张开量的关系如图 11 所示,根据试验结果得到的内道密封垫断面在错台 15 mm 时的防水性能曲线图,随着密封垫的压密,即接缝张开量的减小,密封垫的防水性能逐渐提高,在张开量 6 mm、错台量 15 mm 时其防水能力超过 0.6 MPa。另外,数值模拟计算结果与试验数据基本一致,试验验证了数值模型的准确性。

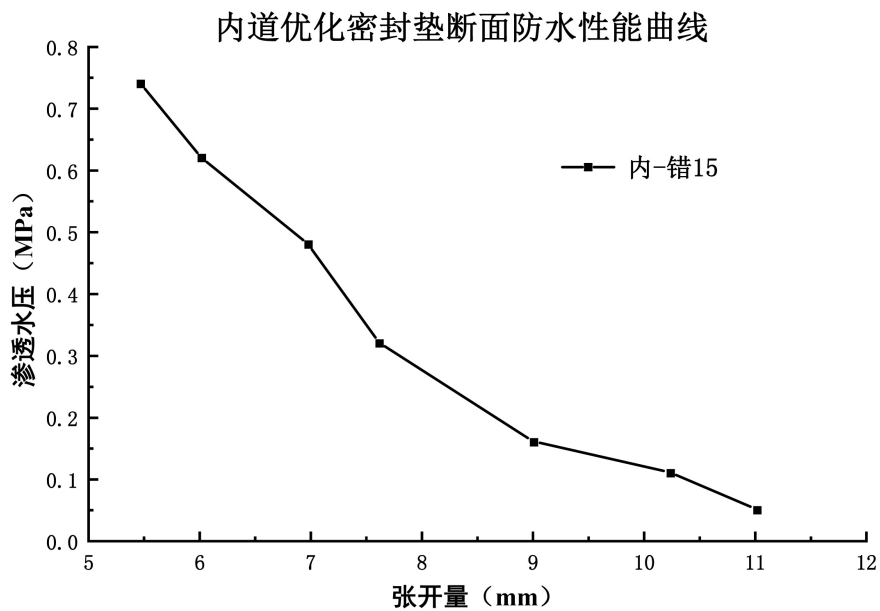


Figure 11. Water pressure resistance curve of waterproof test under 15 mm staggered platform condition of inner channel section

图 11. 内道断面错台 15 mm 工况下防水试验耐水压曲线

5. 结论

1) 中俄东线输气管道穿越长江段盾构工程隧道内径 6.8 m, 管片厚度 0.4 m, 隧道穿越区段最深处水压值约 0.74 MPa, 是目前国内中小直径盾构隧道水压的高值, 确定采用双道三元乙丙橡胶密封垫作为高压输气管道盾构隧道接缝防水组合形式。

2) 充分考虑设计使用年限、材料性能劣化、安全系数等因素, 结合工程特点, 确定了本项目的盾构隧道密封垫防水能力指标: 外道密封垫在极限工况(张开 6 mm, 错台 15 mm)下, 防水能力达到 1.5 MPa, 内道密封垫能够满足一定的短期防水能力, 即对突破外道密封垫的渗漏水起到一定的防水与渗漏水阻渗作用。

3) 采用 ABAQUS 建立三元乙丙弹性密封垫防水能力的预测数值模型, 模型计算结果表明: 外道和内道密封垫在极限工况下的防水能力分别达到 1.5 MPa 和 0.6 MPa, 满足项目防水设计要求。

4) 对内外侧三元乙丙弹性密封垫开展了防水性能试验, 外道和内道密封垫在极限工况下的防水能力分别达到 1.5 MPa 和 0.6 MPa, 验证了数值模型的准确性, 试验结果表明该防水组合形式方案达到防水能力设计指标, 满足工程要求。

参考文献

- [1] 叶美锡, 丁文其, 陈俊伟, 金跃郎, 刘浩, 涂新斌. 盾构隧道管片接缝三元乙丙橡胶密封垫力学性能影响因素敏感度分析[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(z2): 200-206.
- [2] 朱谔钦, 丁文其, 金跃郎, 龚琛杰, 沈奕. 上海市高水压深层排水盾构隧道管片接缝密封垫形式试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2017, 37(10): 1303-1308.
- [3] 吴炜枫, 丁文其, 魏立新, 杨光华. 深层排水盾构隧道接缝防水密封垫形式试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 190-195.
- [4] 朱祖熹. 盾构隧道管片接缝密封垫防水技术的现状与今后的课题[J]. 隧道建设, 2016, 36(10): 1171-1176.
- [5] 洪开荣. 广深港大断面特长水下盾构隧道的技术难点分析[J]. 隧道建设, 2007, 27(6): 1-3+18.
- [6] 伍振志, 杨林德, 季倩倩, 戴胜, 莫一婷. 越江盾构隧道防水密封垫应力松弛试验研究[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(5): 539-543.
- [7] 赵明, 丁文其, 彭益成, 沈碧伟, 郭小红, 杨林松. 高水压盾构隧道管片接缝防水可靠性试验研究[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(3): 87-93.
- [8] 裴利华. 盾构隧道管片结构设计研究[J]. 铁道标准设计, 2009(12): 86-91.
- [9] 赵运臣, 肖龙鸽, 刘招伟, 杨红都. 武汉长江隧道管片接缝防水密封垫设计与试验研究[J]. 隧道建设, 2008, 28(5): 570-575.
- [10] 陆明, 雷震宇, 张勇, 邵臻, 朱祖熹. 上海长江隧道衬砌接缝和连接通道的防水试验研究[J]. 地下工程与隧道, 2008(4): 12-16.
- [11] 李雪, 霍鹏, 周顺华, 黄大维, 黄琦. 盾构隧道双道密封垫防水能力及失效模式研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 159-166.
- [12] 张子新, 孙杰, 朱雁飞, 黄昕, 袁玮皓. 深埋排蓄水隧道接缝密封垫防水性能试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(3): 431-439.
- [13] 向科. 盾构隧道弹性密封垫优化设计与试验研究[J]. 中国建筑防水, 2010(10): 30-35.
- [14] 雷震宇. 盾构隧道管片橡胶密封垫的优化设计方法[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(4): 770-774.
- [15] 向科, 石修巍. 盾构管片弹性密封垫断面设计与优化[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 361-364.
- [16] 龚琛杰, 丁文其. 大直径水下盾构隧道接缝弹性密封垫防水性能研究——设计方法与工程指导[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(10): 1712-1722.