

Performance Analysis of Shield Machine Segment Gasket

Decao Niu

China Railway 15th Bureau Group Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd., Luoyang Henan
Email: 459905815@qq.com

Received: Oct. 30th, 2019; accepted: Nov. 26th, 2019; published: Dec. 3rd, 2019

Abstract

In view of the difficulties in the construction design of a water diversion project in Shanxi Province, such as single track single tunnel, high waterproof requirements and deep buried depth of the tunnel, on the basis of the calculation formula of rectangular rubber compression spring, η is introduced as the coefficient of change of rectangular shape factor, so as to calculate the compression force on the segment gasket. At the same time, based on the rubber Mooney-Rivlin constitutive model, the finite element method is used to analyze the shield Sealing performance of segment gasket. The results show that: with the increase of compression, the force on the segment gasket is also increasing; when the compression of the segment gasket is 5 mm, the pressure on the gasket is 1.69 MPa and 1.79 MPa, respectively, which is smaller, and larger than the water and soil pressure, which meets the sealing performance. The research results provide a theoretical reference for the design of segment gasket, which is of great engineering value for the construction of TBM in the environment of high water and soil pressure.

Keywords

Shield Machine, Segment Gasket, Sealing Performance

盾构机管片密封垫密封特性分析

牛得草

中铁十五局集团城市轨道交通工程有限公司, 河南 洛阳
Email: 459905815@qq.com

收稿日期: 2019年10月30日; 录用日期: 2019年11月26日; 发布日期: 2019年12月3日

摘要

针对山西省某引水工程施工设计为单线单洞, 隧洞防水要求高、埋深大等难点, 在矩形橡胶压缩弹簧计算

公式的基础上,引入 η 为类矩形形状因子变化系数,从而计算管片密封垫所受的压缩力,同时基于橡胶 Mooney-Rivlin本构模型的基础上,采用有限元方法分析了盾构机管片密封垫密封性能。结果表明:随着压缩量的增大,管片密封垫所受的力也在增大;理论计算跟仿真分析管片密封垫压缩量为5 mm时,密封垫的所受压力为分别为1.69 MPa和1.79 MPa相差较小,且同时大于所处的水土压力值,满足密封性能。研究结果为管片密封垫设计提供了理论参考,对隧道掘进机在高水土压力环境中的施工具有重要工程价值。

关键词

盾构机,管片密封垫,密封性能

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

盾构隧道施工中因埋深而受到水土的压力作用,致使管片之间容易产生渗漏现象,对隧道使用功能有严重的影响。盾构隧道管片之间防水是通过预留沟槽嵌套密封垫来达到目的,密封垫的可靠性能决定了隧道的整体质量和安全,重复性的出现渗漏现象,返修时投入人力物力,严重的影响到施工效率和成本[1][2][3]。

随着盾构施工埋深的深度不断增大,密封垫所受的水土压力增大。密封垫可靠性在于所受的接触应力大于水土压力才能起到密封效果,因此针对管片密封垫密封性能的研究对于提高隧道寿命、降低施工成本等具有重大意义。国内外学者对管片密封性能进行了大量研究。Ding [4]等人研究开发了一套新颖的装置,用以研究在施工和操作阶段,在现场荷载条件下,检测管片密封垫的密封性能及力学行为。Gong [5]等人采用试验与计算相结合的方法对南京渭三公路隧道(南京渭三公路隧道)进行了密封性与力学性能的研究,建立了密封垫的有限元模型,并对试验结果进行了验证。Shi [6]等人根据隧道管片接头的使用环境,对三元乙丙橡胶在地下水环境中进行加速老化试验,得出其性能退化规律。根据材料老化后力学性能的变化规律,提出了一种用于管段连接的三元乙丙橡胶垫片的时变本构模型,并利用室内老化试验的结果,得到了材料老化后力学性能的时变参数表达式。Shalabi [7]等人在静载荷和动载荷作用下,对密封垫的隧道衬砌管片的渗漏特性,设计实验分析不同垫圈材料在水压小于0.9 MPa时的密封性能(氯丁橡胶和三元乙丙橡胶垫圈,带开口底座)。Shalabi [8]等人研究了槽内垫片的力学性能和密封性能。考虑了两种类型的垫圈:低设计水压的开式底座垫圈和高水压的闭式底座垫圈。重点研究了密封垫在槽内载荷作用下的变形行为和密封垫的密封潜力,包括密封垫接触载荷、松弛、挤压以及水压作用下接头间隙的变化。Li [9]等人首次对上海地铁13号线采用的纵缝进行了足尺试验,实验中考虑到混凝土、螺栓和垫片对接头力学性能的影响。董林伟[10]设计实验研究密封垫两侧侧限材料的不同,对密封垫耐水压力试验的影响。陈云尧[11]等人利用ABAQUS软件建立二维模型,采用平均接触压力作为评价指标,分析盾构隧道管片接缝处于不利工况下的失效模式;最后结合橡胶硬度参数、密封垫孔洞参数调整,研究密封垫防水性能改善方法。龚琛杰[12]等人在调研国内典型大直径水下盾构隧道的接缝防水构造的基础上,建立接缝弹性密封垫的设计方法,该设计方法由工程参数提取、试验前有限元预分析、试验研究和试验后有限元分析4部分内容构成。最后,应用该设计方法成功指导南京纬三路长江隧道的接缝弹性密封垫设计,证明其科学性和可行性。吴炜枫[13]等人以广州深层排水盾构系统东濠涌试验段工程为依托,根据工程实际尺寸1:1制作了弹性密封垫和混凝土试件,进行密封垫防水试验,确保弹性密封垫具有稳定的长期耐高水压性能。

以上研究在试验方面对管片密封垫的分析已经很成熟,但是试验过程繁重且不易操作。因此考虑利用有限元软件对管片密封垫进行密封特性分析。对于隧道安全性能要求,长时间处于高水压的环境中,对密封性能要求更加严格。利用 ansys 软件,建立管片密封垫的仿真模型,由于模型处于对称结构,故建立二维模型,减少仿真时间,设计方案使密封垫模型在不同的压缩位移下,分析管片密封垫所受接触应力和 Von Mises 应力,分析管片密封垫的密封性能,为管片密封设计提供理论基础。

2. 工程背景

山西省某引水工程施工设计为单线单洞隧洞,盾构区间起始里程为 K52 + 854,终止里程为 K47 + 337.1,隧道全长 5516.9 m,隧道内径 4520 mm,外径 5220 mm,设计纵坡 1/3000,采用一台泥水盾构自下游向上游掘进。工程标段主要横穿中条山及其北麓,地面高程在 530~600 m 之间,地形总体沿隧洞出口方向逐渐降低,洞线位于地下水位以下,地下水位高出洞底最大约 105 m,也即工作环境地下水最大压力大小为 10 bar,且地下水位沿着隧洞出口方向逐渐降低。根据施工地段地质岩土勘察报告,隧道埋深 60~100 m,标段地层上部为第四系全新统洪冲积物、下部为第四系上更新统洪积物。盾构法施工的主要隧洞穿越硬岩性为卵石混合土、含砂低液限粘(粉)土。砂卵石的主要成分是片麻岩、混合花岗岩、辉绿岩、角闪岩等,充填物为低液限粉土及中粗砾。施工区间桩号 K52 + 854~K49 + 500 段以低液限粘土为主,位于地下水位以下 0~30 m 向掘进方向地下水位逐渐升高;桩号 K49 + 500~K47 + 350 段以卵石混合土为主,位于地下水位以下 30~105 m,其中桩号 K47 + 500~K47 + 350 位于地下水位 90~105 m。

3. 管片橡胶密封垫的参数确定

EPDM(三元乙丙橡胶)橡胶密封垫是国内管片密封的主流材料,一般为多孔性,具有较好的耐压缩性,靠预压缩后产生的回弹力给密封接触面一定压力,当施工中由于管片拼装产生一定的间隙和偏移时,密封垫的密封性能依旧很好。由于实际施工过程中很难对其进行密封性能分析,故建立密封垫模型,利用 ansys 有限元软件模拟工作状态。现做如下假设[14][15]:①三元乙丙密封垫的材料的弹性模量和泊松比不随着密封垫压缩量改变而改变;②密封垫在压缩过程中的体积不随压缩而变化;③混凝土的弹性模量比密封垫的大很多,将混凝土所做的边界当做刚性边界;④不考虑温度对橡胶材料的影响。

针对橡胶材料模型和本构方程,国内外学者已经提出许多用于描述橡胶材料应力应变关系的应变能函数:如 Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 模型[16][17] Mooney-Rivlin 模型可以针对橡胶大变形性能问题提供解决方法,因此本文材料 Mooney-Rivlin 模型 2 参数来描述三元乙丙橡胶材料性能。

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

式中 W 为应变能密度, C_{ij} 为 Mooney-Rivlin 系数, I_1, I_2 为第一,第二应力张量不变量。橡胶材料弹性模量 E_0 和剪切模量 G 有如下关系:

$$G = \frac{E_0}{2(1 + \mu)} \quad (2)$$

由于前面已对橡胶材料进行假设,由橡胶材料不可压缩性可得泊松比 $\mu = 0.5$, (2)式可得 $E_0 = 3G$ 。剪切模量 G 与弹性模量 E_0 与系数 C_{10}, C_{01} 的关系为:

$$E_0 = 3G = 6(C_{10} + C_{01}) \quad (3)$$

结合 C_{10}, C_{01} 的经验比值 $C_{10} = 4C_{01}$, 建立起弹性模量 E_0 与橡胶材料系数 C_{10}, C_{01} 的数学关系。橡胶材料一般情况下橡胶硬度是已知的,根据橡胶硬度 HA 和弹性模量 E_0 的数学关系式[18]:

$$E_0 = \frac{15.75 + 2.15HA}{100 - HA} \quad (4)$$

结合上述所列式子由橡胶材料硬度 HA 便可确定橡胶材料系数 C_{10}, C_{01} 的值, 如表 1 所示。

Table 1. Properties of EPDM
表 1. 三元乙丙橡胶材料性能

名称	管片密封垫模型
弹性模量	7.08 MPa
Mooney-Rivlin 系数	$C_{10} = 0.944$ $C_{01} = 0.236$

4. 管片密封垫模型建立

盾构机隧道施工过程中, 需要拼装管片。由于盾构法施工的主要隧洞穿越硬岩性为卵石混合土、含砂低液限粘(粉)土。砂卵石的主要成分是片麻岩、混合花岗岩、辉绿岩、角闪岩等, 充填物为低液限粉土及中粗砾, 而且洞口位于水平线一下, 因此隧道管片密封垫受到较大的水土压力。因此管片密封垫的密封性能直接决定隧道的安全性和使用性。考虑到管片密封垫的结构和受力作用, 对实际使用的管片密封垫进行简化建模, 建立如图 1 所示模型。

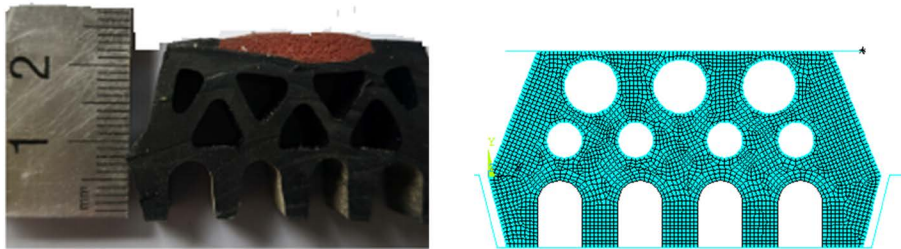


Figure 1. Segment gasket

图 1. 管片密封垫

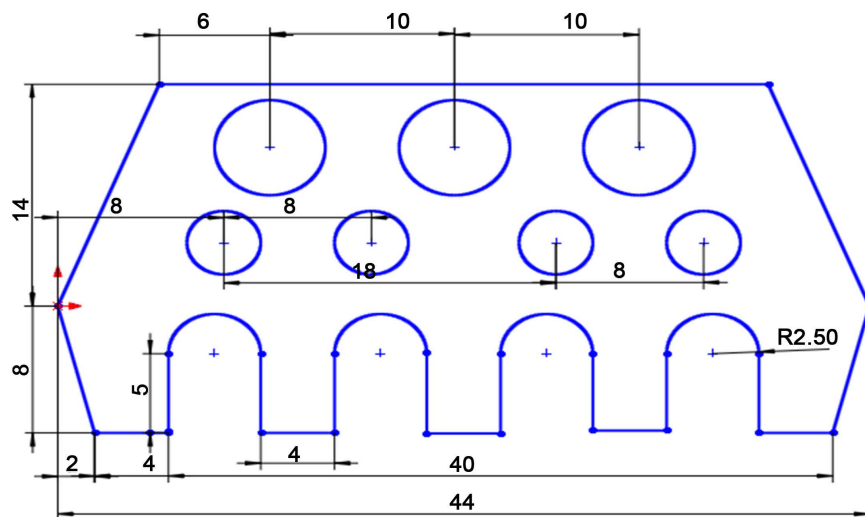


Figure 2. Geometric dimension of segment gasket

图 2. 管片密封垫几何尺寸图

采用二维 plane182 轴对称单元, 使用平面应变的单元行为。管片密封垫与刚体壁面之间设置为面-面接触(Surface-Surface), 管片密封垫表面为接触面, 使用 CONTA172 单元模拟, 设置该接触单元刚度在每一次迭代计算后基于下伏实体单元的平均应力进行更新, 刚体为目标面, 使用 TARGER169 单元模拟。共 10,929 个节点, 11,633 个单元, 施加载荷为固定下部刚体, 对上部刚体施加向下的位移载荷。密封垫的具体尺寸为如图 2 所示。

5. 管片密封垫密封性能分析

5.1. 管片密封垫压缩理论分析

管片密封垫的形状不是规则图形, 而且橡胶受到压缩而变形, 其受力跟位移是非线性问题, 想要从理论方面直接计算管片密封垫受压变形力计算很难, 因此借鉴矩形橡胶压缩弹簧的计算公式, 得出管片密封垫的压缩受力计算公式。

根据机械设计手册[19]和文献[20]中提出矩形橡胶压缩弹簧的计算公式:

$$L = \frac{Fh}{E_a ab} \quad (5)$$

中 L 为橡胶的压缩量, F 为压缩力, h 为橡胶弹簧自由高度, a 为橡胶弹簧的自由长度, b 为橡胶弹簧的自由宽度, E_a 为橡胶弹簧表现弹性模量, $E_a = iG$, i 为橡胶弹簧的几何形状和硬度的影响因子, $i = 3.6(1 + 2.22S^2)$, S 形状因子之比即橡胶承载面积与自由面积之比, $S = \frac{ab}{2h(a+b)}$, G 剪切模量。

对于本文管片密封垫, 作出以下假设: ① 将管片密封垫视为类矩形, 其形状因子 S 满足: $S = \eta \frac{ab}{2h(a+b)}$, η 为类矩形形状因子变化系数, 范围为 0.6~1, 随着压缩量变化变化。

② 忽略受压管片密封垫截面的两侧边受力和变形。

$$F = \frac{E_a abL}{h} \quad (6)$$

根据管片设计资料和管片拼装质量检测标准, 选取管片最大的张开量为 6 mm, 因此压缩量可设计为 1、2、3、4、5、6 mm, 计算受力为:

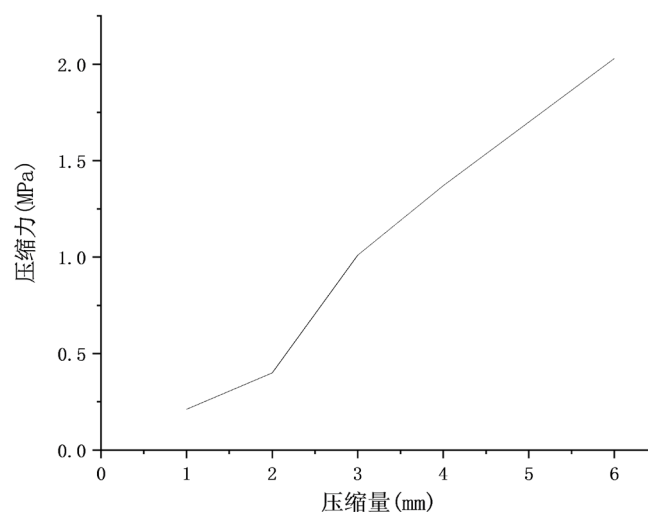


Figure 3. Compression force of segment gasket under different compression
图 3. 不同压缩量下管片密封垫所受的压缩力

由图 3 可得管片密封垫在压缩量为 5 mm 时的压缩力 1.69 MPa, 根据作用力与反作用力原则, 其反向力大小也为 1.69 MPa, 大于水土压力时, 满足管片密封垫的密封条件, 保证了管片密封垫的正常密封性能。

5.2. 管片密封垫仿真分析

Von Mises 应力含义是当单元体的形状改变比能达到一定程度, 材料开始屈服。接触应力是两个物体互相挤压时在接触区附近产生的应力, 反映了管片密封垫的密封能力, 当管片密封垫的接触压力不小于水土压力则说明该密封垫的密封性能良好[21] [22]。

由于本工程隧道位于地下水位以下, 地下水位高出洞底最大约 105 m, 也即工作环境地下水最大压力大小为 10 bar, 且地下水位沿着隧洞出口方向逐渐降低。管片接缝防水的好坏直接影响着隧道的整体质量和安全。根据管片设计资料和管片拼装质量检测标准, 选取管片最大的张开量为 6 mm, 张开量为两个管片之间的空隙距离。因此本文选取位移载荷梯度为 1、2、3、4、5、6 mm。压缩量 5 mm 所对应的是管片最大张开量 6 mm 位置。

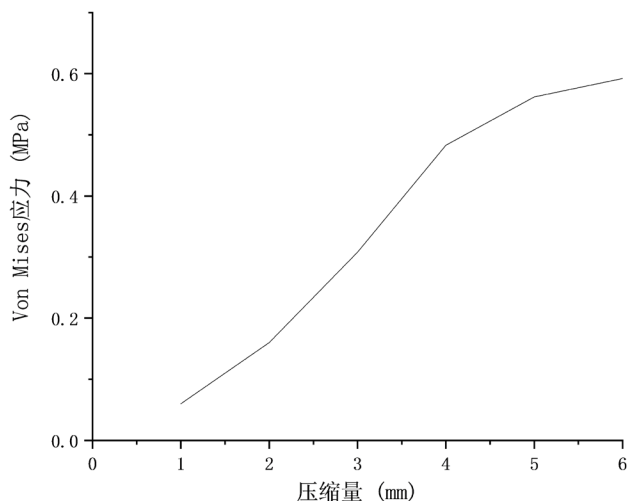


Figure 4. Maximum Von Mises stress diagram of segment gasket under different compression
图 4. 不同压缩量下的管片密封垫的最大 Von Mises 应力图

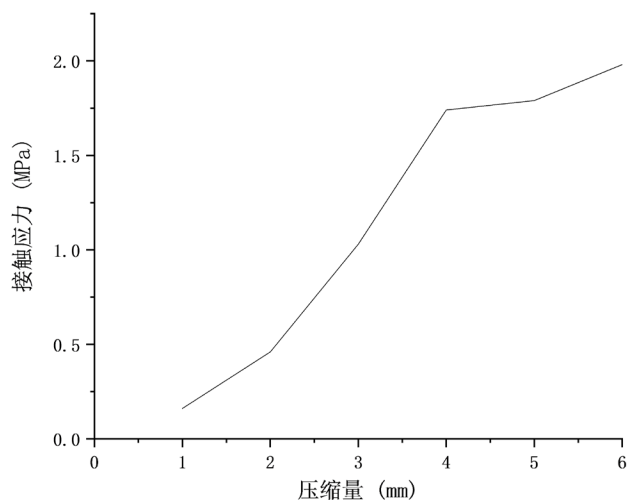


Figure 5. Maximum contact stress diagram of segment gasket under different compression
图 5. 不同压缩量下的管片密封垫的最大接触应力图

综合图 4 和图 5 可以看出, 管片密封垫随着压缩量的增大而变形增大, 其抵抗变形的应力增大, 所以接触应力和 Von Mises 应力随着压缩量增加而增大。当压缩量为 5 mm 之后, 接触应力和 Von Mises 应力随着压缩量增大的幅度减小。此时管片密封垫的 Von Mises 应力为 0.562 MPa, 接触压力为 1.79 MPa。当接触压力大于水土压力时, 满足管片密封垫的密封条件, 保证了管片密封垫的正常密封性能。

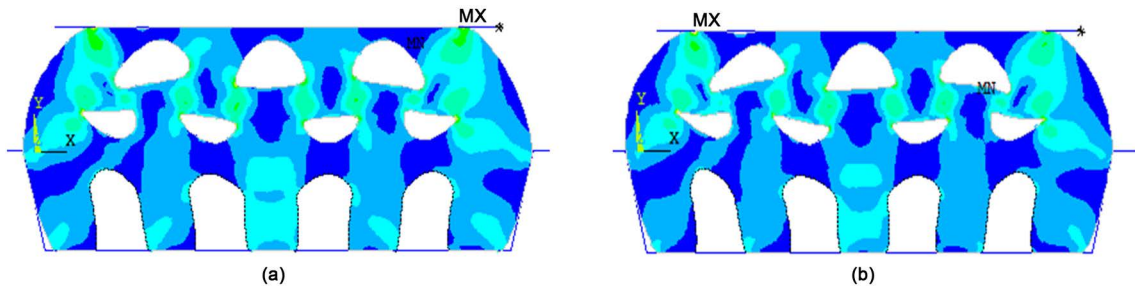


Figure 6. Von Mises stress nephogram. (a) Compression 4 mm; (b) Compression 5 mm
图 6. Von Mises 应力云图。(a) 压缩量 4 mm; (b) 压缩量 5 mm

从图 6 可以看出随着压缩量的变化, Von Mises 应力峰值的位置也在发生变化, 即说明了在随着压缩量的变化过程中可能出现破坏的位置是不断变化的。

5.3. 管片密封垫受力分析对比

管片密封垫压缩理论分析通过对矩形橡胶压缩弹簧计算公式进行因地制宜化, 引入 η 为类矩形形状因子变化系数, 对管片密封垫进行理论计算得出管片密封垫所受的压应力。管片密封垫分析是通过有限元仿真软件对密封垫受压过程进行模拟, 得到密封垫的最大接触应力。通过受力分析可得压缩力和最大接触应力是相同的。

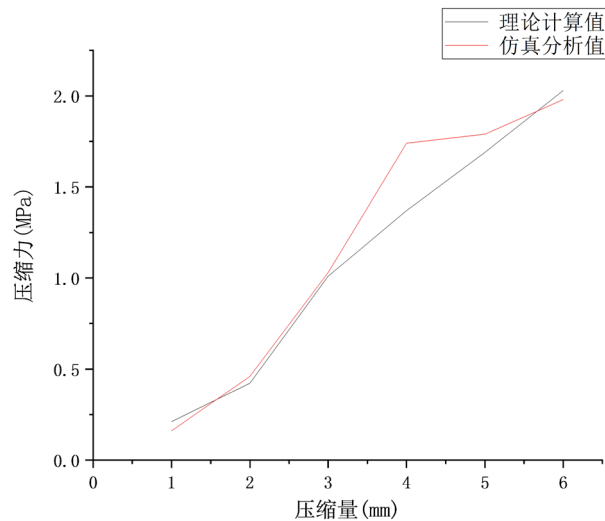


Figure 7. Comparison of compression force values of segment gasket under different compression amounts
图 7. 在不同压缩量下管片密封垫压缩力值对比图

通过图 7 可以看出由理论计算所得管片密封垫所受的压缩力与仿真分析具有相同的一致性, 从而验证了滚刀密封垫仿真分析的正确性。从图中看出两条线没有完全重合, 很大程度是因为所做的假设情况没有考虑到, 存在偏差。

6. 结论

1) 通过在矩形橡胶压缩弹簧计算公式的基础上,因地制宜的分析管片密封垫的实际情况,引入 η 为类矩形形状因子变化系数,从而计算管片密封垫所受的压缩力,为分析管片密封垫密封性能提供理论基础。

2) 以橡胶 Mooney-Rivlin 本构模型的基础上,采用有限元方法分析了盾构机管片密封垫密封性能,计算了管片密封垫在不同的压缩量情况下管片密封垫所受的最大接触应力和 Von Mises 应力。管片密封垫所受最大接触应力和 Von Mises 应力随着自身的压缩量的增大而增大,当压缩量达到 5 mm 时,最大接触应力为 1.79 MPa,满足密封条件,此时达到管片最大张开量。与实际情况相符,可以判断建立的模型的正确性,研究结果管片为密封垫设计提供了理论参考,对盾构机在高水土压力环境中的施工具有重要工程价值。

3) 理论计算跟仿真分析管片密封垫压缩量为 5 mm 时,密封垫的所受压力为分别为 1.69 和 1.79 MPa 相差较小,验证了管片密封垫仿真分析的正确性。管片密封垫仿真分析为管片密封垫密封性能提供了一种可利用的途径。

参考文献

- [1] 丁杨, 孟伟, 邓文武. 盾构管片橡胶密封垫断面形式设计及耐久性研究[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 45-49.
- [2] 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(2): 361-364.
- [3] 雷震宇, 刘明. 盾构管片弹性橡胶密封垫防水性能灵敏度分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 336-341.
- [4] Ding, W., Gong, C., Mosalam, K.M., et al. (2017) Development and Application of the Integrated Sealant Test Apparatus for Sealing Gaskets in Tunnel Segmental Joints. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **63**, 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.008>
- [5] Gong, C., Ding, W., Soga, K., et al. (2018) Sealant Behavior of Gasketed Segmental Joints in Shield Tunnels: An Experimental and Numerical Study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **77**, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.029>
- [6] Shi, C., Cao, C., Cheng, Y., et al. (2015) Time-Dependent Performance and Constitutive Model of EPDM Rubber Gasket Used for Tunnel Segment Joints. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **50**, 490-498. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.09.004>
- [7] Shalabi, F.I., Cording, E.J., Paul, S.L., et al. (2012) Concrete Segment Tunnel Lining Sealant Performance under Earthquake Loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **31**, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2012.04.006>
- [8] Shalabi, F.I., Cording, E.J. and Paul, S.L. (2016) Sealant Behavior of Gasketed Segmental Tunnel Lining—Conceptual Model. *Geomechanics and Tunneling*, **9**, 345- 355. <https://doi.org/10.1002/geot.201500030>
- [9] Li, X., Yan, Z., Wang, Z., et al. (2015) A Progressive Model to Simulate the Full Mechanical Behavior of Concrete Segmental Lining Longitudinal Joints. *Engineering Structures*, **93**, 97-113. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.011>
- [10] 董林伟, 江玉生, 嵇长民, 陈高, 江涛, 黄钦. 隧道管片密封垫防水试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(18): 299-302.
- [11] 陈云尧, 张军伟, 马士伟, 李雪. 盾构隧道管片密封垫防水失效模式及改善研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 946-952.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 雷震宇, 刘明. 具有随机参数的盾构管片弹性密封垫防水性能优化分析[J]. 应用数学和力学, 2017, 38(8): 899-910.

-
- [15] 王湛. 水下盾构隧道弹性密封垫防水失效数值模拟研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1164-1168.
- [16] 张良, 李忠华, 马新强. 橡胶 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型的参数特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(S2): 427-430.
- [17] 黄建龙, 解广娟, 刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业, 2008(8): 467-471.
- [18] 王伟, 邓涛, 赵树高. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品, 2004(4): 8-10.
- [19] 成大先. 机械设计手册(1-5 卷) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [20] 闫余加. O 形胶圈受压弹性变形压力的计算[J]. 机械管理开发, 2009, 24(2): 63-64+66.
- [21] 雷震宇, 王志强, 江竹. 随机参数影响下橡胶密封垫的应力松弛特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 535-539.
- [22] 刘情情, 张琳, 王兆波. 低密度聚乙烯/三元乙丙橡胶热塑性硫化胶的压缩应力弛豫及其可逆回复[J]. 合成橡胶工业, 2018, 41(2): 146-150.