文章编号：1009-6582(2022)05-0195-07 DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2022.05.024

引文格式：贺创波，许 超，杨 钊，等. 考虑沟槽边界和粘贴质量的管片密封垫防水性能研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 195-201.
HE Chuangbo, XU Chao, YANG Zhao, et al. Research on the Waterproof Performance of Segment Rubber Gasket Considering the Groove Boundary and Paste Quality[J].Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(5): 195-201.

考虑沟槽边界和粘贴质量的管片密封垫防水性能研究

贺创波[1,2,3] 许 超[1,2,3] 杨 钊[1,2,3] 刘朋飞[1,2,3] 郑甲佳[4] 高如超[1,2,3]

（1. 中交第二航务工程局有限公司，武汉 430040; 2. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心，武汉 430040; 3. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室，武汉 430040; 4. 中国路桥工程有限责任公司，北京 100011）

摘 要：针对底部平型和梳型橡胶密封垫结构，采用有限元软件建立三维计算模型，开展密封垫沟槽、粘贴质量对密封垫防水性能影响研究，探究密封垫防水薄弱点，并开展模型试验进行验证。研究表明：(1)橡胶密封垫压缩过程中易向两侧管片间隙中变形，使沟槽内实际面积减小，降低密封垫防水能力。(2)底部梳型密封垫粘贴固定时，密封垫间接触面是接头防水薄弱点；当未粘贴时密封垫间接触应力与粘贴固定时相比降低了25.8%，防水薄弱环节为密封垫底部与沟槽接触面。(3)平型密封垫在未粘贴的情况下，压缩过程结构也较为稳定，粘贴质量对密封垫防水性能影响较小。

关键词：盾构隧道；橡胶密封垫；平型；梳型；沟槽；接触应力

中图分类号：U453.6 **文献标识码**：A

1 引 言

三元乙丙橡胶耐老化性、耐候性、耐化学腐蚀性、耐冲击弹性较好，是我国应用最广泛的盾构隧道防水材料。管片拼装过程中压缩橡胶密封垫，通过橡胶密封垫间的接触应力来止水。由于防水材料粘贴、管片拼装、地层不均以及运营期荷载等影响，盾构隧道接缝会出现错台、张开等问题，造成橡胶密封垫压缩量不足，错位量过大，管片接头防水能力降低出现渗漏。

目前很多学者对橡胶密封垫的防水性能进行研究。肖明清等[1]提出其防水能力受接触面最大接触应力和接触面细微孔洞的水流阻力双控制；郭忠等[2]提出角部开孔相比不开孔时压缩指标减小38.3%；Gong 等[3]通过数值模拟试验得出，密封垫的防水能力与密封垫接触面平均压力存在紧密的联系；李 拼等[4]提出密封垫与接触面上的扭曲交互能提高接触面上的有效应力占比；钟元元等[5]提出双道密封垫抗水压能力较单道密封垫抗水压能力更强；罗 驰等[6]发现橡胶密封垫压缩的蠕变形变与蠕变时间的对数近似呈线性关系；Shalabi 等[7]通过进行一字缝与 T 形缝的泄水压力试验，分析了在静态荷载和动态荷载下接缝防水性能的变化规律。

在断面设计方面，Ding 等[8]运用三向加载防水性能试验系统，进行了密封垫闭合压缩力和防水性能试验，通过试验得到满足高水压三元乙丙密封垫截面形式。张稳军等[9]指出与六边形截面形式的遇水膨胀橡胶块相比，梯形截面形式的遇水膨胀橡胶块能够大幅提升中孔复合型密封垫的防水性能；陈云尧等[10]认为盾构隧道管片接缝密封垫闭合孔采用双排孔形式防水效果最好；叶美锡等[11]提出影响密封垫装配时所需压缩力的因素主次顺序为张开量、断面开孔率、橡胶硬度、开槽数量、开孔形状、其他因素以及错位量；王 旭等[12]采用二维有限元模型，根据压缩反力曲线、压缩形态、接触面应力大小及分布等指标综合分析确定内、外道密封垫断面。

目前对橡胶密封垫的研究主要集中在密封垫防水机理、断面优化等方面，而对密封垫粘贴质量及密

收稿日期：2022-06-10
修回日期：2022-08-29

作者简介：贺创波(1988-)，男，硕士，高级工程师，主要从事隧道与地下工程方面的研究工作，E-mail：1024283354@qq.com.

封垫沟槽对变形影响研究较少，本文依托某大直径盾构隧道工程，考虑橡胶密封垫粘贴质量，开展橡胶密封垫防水能力研究，并开展物理模型试验进行验证，为隧道防水设计及施工提供参考。

2 密封垫断面设计及计算模型建立

2.1 工程概况及防水指标要求

某海底隧道盾构段全长2 460 m，埋深6.0~34.8 m，最大纵坡5.84%，最小平面曲线半径R=1 200 m，最小竖曲线半径R=2 200 m。盾构沿线掘进地层主要为中砂、粗砂、砂质黏性土、淤泥质黏土、黏土、全风化混合花岗岩、强风化混合花岗岩、中风化混合花岗岩、微风化混合花岗岩等，隧道采用双道三元乙丙橡胶密封垫。

目前隧道防水设计一般考虑三元乙丙橡胶硫化胶在100 a后的压缩应力不低于0.65(65%)，并且一般考虑1.2~1.4防水安全系数。依托隧道最大埋深为22.3 m，海水高度按最大波浪5 m考虑，防水指标取为0.55 MPa，因此设计橡胶密封垫最大防水能力为1.2 MPa。

2.2 橡胶密封垫断面设计

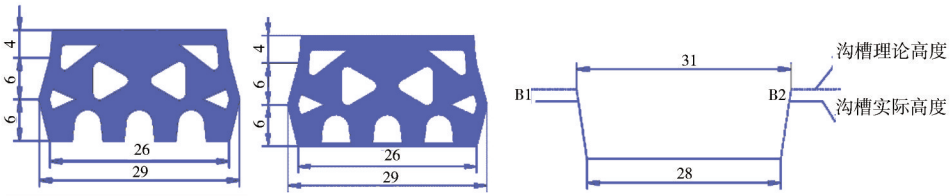
硫化橡胶材料的泊松比μ一般在0.499左右，接近于液体的泊松比0.5，因此橡胶可近似看作是一种体积不可压缩的材料。为能使密封垫完全压密(环缝张开量为0)，密封垫沟槽截面积应大于等于密封垫的截面积，其关系应按式(1)计算：

$$A=(1\sim1.15)A_0 \tag{1}$$

式中：A为密封垫沟槽截面积；A_0为弹性密封垫截面积。

由于管片制造、拼装误差等影响，拼装后的密封垫难以正对(错位量0)且完全压缩(张开量为0)，结合项目质量控制标准，以张开量3 mm、错位量5 mm为隧道防水的极限工况，设计橡胶密封垫，密封垫A_0取1.034，密封垫沟槽理论设计高度为10 mm，实际沟槽高度取8 mm，密封垫及沟槽设置如图1所示。

2.3 计算模型建立



(a) 底部梳型密封垫　(b) 底部平型密封垫　(c) 密封垫沟槽

图1 密封垫及沟槽设计

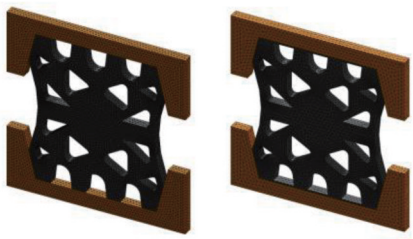
Fig.1 Gasket and groove design

根据橡胶密封垫断面形式和实际工程设计尺寸建立三维计算模型，模型宽度取2 mm，图2分别为底部平型和底部梳型几何模型。

由于混凝土刚度远大于三元乙丙橡胶(EPDM)，因此管片密封垫粘贴沟槽视为刚体，EPDM材料为超弹性材料，选择Mooney-Rivlin本构模型，即：

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3) \tag{2}$$

式中：W为应变能函数；I_1、I_2是变形张量不变量；C_{10}和C_{01}为模型中的2个主要参数。设计采用橡胶密封垫硬度为67°，根据单周拉伸试验，得到的数据曲线，拟合得出C_{10}=0.67 MPa，C_{01}=0.16 MPa。



(a) 底部梳型模型　(b) 底部平型模型

图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

3 沟槽对橡胶密封垫防水性能的影响

在理论沟槽情况下进行密封垫压缩，当密封垫压缩到张开量为0时，则沟槽两侧管片完全接触，但是由于传力衬垫、管片环面凸台等设置，密封垫沟槽往往低于压缩中线，压缩过程中密封垫可能会向两侧管片间隙中变形。为了探究密封垫沟槽设置高度对橡胶密封垫防水性能影响，分别在理论沟槽和实际沟槽两种情况下压缩橡胶密封垫，压缩后变形分别如图3和图4所示。

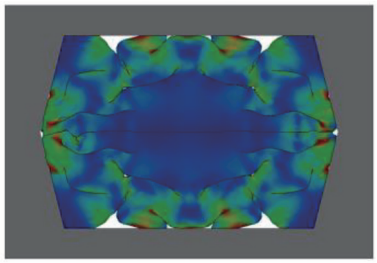


图3　理论沟槽压缩应力(*B*=0)

Fig.3　Theoretical groove compressive stress(*B*=0)

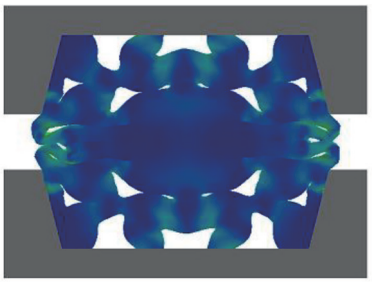


图4　实际沟槽压缩应力(*B*=2 mm)

Fig.4　Actual groove compressive stress (*B*=2 mm)

当沟槽高差*B*为0时,密封垫基本对称压缩,压缩过程中密封垫两侧斜面弯曲变形后接触,完全压缩后密封垫基本填充满整个沟槽;当沟槽高差*B*为2 mm时,压缩过程中密封垫会侵入密封槽外管片间隙中,导致模型出现不收敛,密封垫无法压缩到位。

橡胶密封垫完全压缩时,上下密封垫接触面应力平均值为3.18 MPa,上下密封垫与沟槽接触应力基本相同,平均接触应力3.98 MPa,如图5所示。完全压缩时密封垫与沟槽接触应力远大于密封垫间接触应力,上下密封垫接触面为管片接头防水的薄弱点。

沟槽在密封垫压缩过程中,约束密封垫向两侧管片间隙扩展,一旦密封垫扩展到两侧管片间隙中,则会造成面积系数的减小,降低密封垫防水能力,同时过多的密封垫进入管片间隙,不利于管片拼装质量控制。

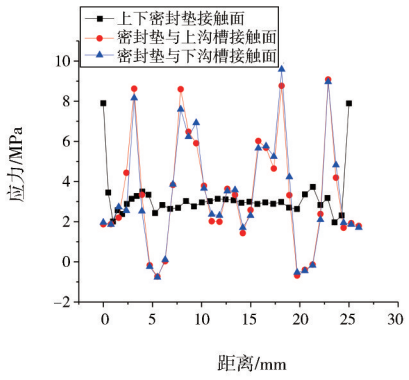


图5　橡胶密封垫受力

Fig.5　Stress of the rubber gasket

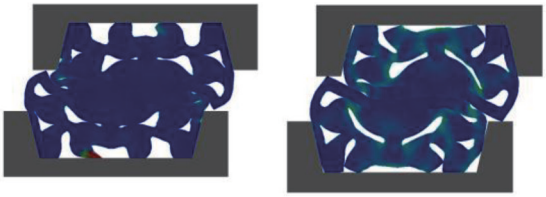
4　粘贴性能对橡胶密封垫防水的影响

4.1　梳型密封垫粘贴质量对防水影响研究

目前橡胶密封垫基本在现场进行粘贴,由于操作不规范,多次转运等原因导致橡胶密封垫存在粘贴不牢固,拼装过程中脱落等情况。为了探究粘贴质量对密封垫防水的影响,考虑密封垫与沟槽粘贴牢固及完全未粘贴两种极限工况,完全粘贴时在计算模型中将密封垫与沟槽接触面耦合设置,完全未粘贴时在模型中将密封垫与沟槽接触面设置为不侵入,使密封垫和沟槽可自由接触和脱离。

为探究粘贴质量对密封垫极限工况下的防水能力影响,针对所设计的梳型橡胶密封垫,在错位量5 mm情况下压缩至张开量3 mm,压缩后密封垫变形如图6所示。

将密封垫间接触应力绘制成曲线,如图7所示,与完全压缩相比,张开量3 mm,错位量5 mm时密封垫间接触应力大大降低,粘贴时密封垫间接触应力为均值为1.24 MPa,未粘贴时密封垫间平均接触应



(a)粘贴　　(b)完全未粘贴

图6　梳型密封垫应力云图

Fig.6　Compressive stress of comb-shaped gasket

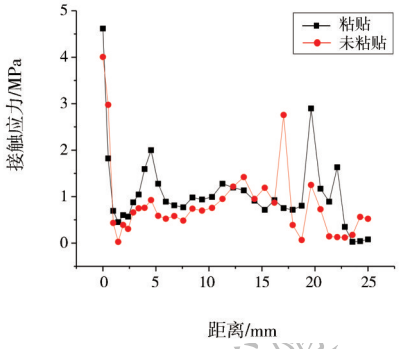


图7　梳型密封垫间接触应力

Fig.7　Contact stress between comb-shaped gaskets

力为0.92 MPa，密封垫间接触应力降低了25.8%，主要原因是当密封垫粘贴牢固时，橡胶密封垫结构受力稳定，压缩了上层孔洞，同时上下密封垫间产生交互包裹，延长了渗流路径，有利于结构防水；当未粘贴牢固时，密封垫中部橡胶支腿会向两侧滑移倾倒，造成密封垫失稳，密封垫下部孔洞压缩较多，导致密封垫间接触应力下降。

密封垫与沟槽接触应力如图8、图9所示。当密封垫粘贴固定，密封垫整体受力较好，密封垫底部与沟槽平均接触应力为1.92 MPa，侧边接触应力为0.59 MPa；当密封垫未粘贴固定时，由于梳型支腿局部翘曲，导致局部接触应力减弱，接触应力为0.68 MPa，同时密封垫向两侧扩展，密封垫侧边与沟槽接触应力增大，平均接触应力为0.95 MPa。

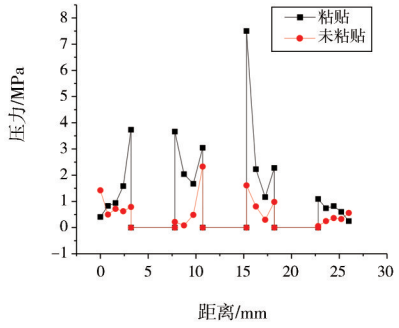


图8 梳型密封垫底部与沟槽接触应力

Fig.8 Contact stress between comb-shaped gasket bottom and groove

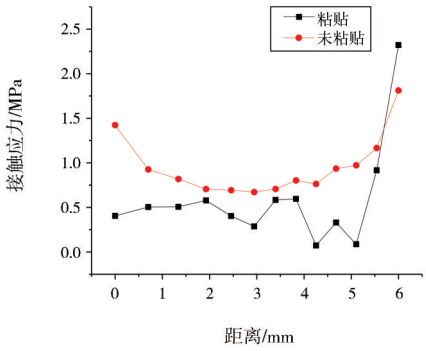


图9 梳型密封垫侧边与沟槽接触应力

Fig.9 Contact stress between comb-shaped gasket side and groove

密封垫粘贴牢固情况下，密封垫间接触面为防水薄弱点，当密封垫未粘贴时，底部梳形密封垫发生倾倒，密封垫与沟槽接触面积减小，平均接触应力降低，密封垫与沟槽为防水的薄弱面，密封垫粘贴质量对梳型密封垫防水有很大的影响。

4.2 平型密封垫粘贴质量对防水性能影响研究

采用梳型橡胶密封垫，当密封垫粘贴不牢固时，防水性能难于满足防水要求。为了提高密封垫受压过程中的整体稳定性，增大密封垫与管片沟槽的接触应力，设计底部平型密封垫，研究密封垫在完全粘贴和完全脱离极限工况下的防水能力。

平型密封垫由于底部支撑间存在连接，当完全未粘贴压缩时，橡胶密封垫稳定性相对较好，相比梳型没有出现严重的翘曲变形，但是压缩过程中同样会向两侧滑移，压缩后应变云图如图10、图11所示。

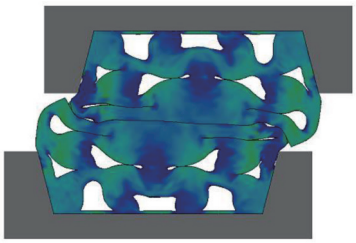


图10 平型密封垫完全粘贴压缩应变云图

Fig.10 Contour of compressive strain of fully-pasted flat-shaped gasket

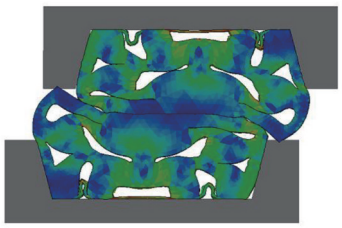


图11 平型密封垫未粘贴压缩应变云图

Fig.11 Contour of compressive strain of non-pasted flat-shaped gasket

粘贴牢固时密封垫间接触应力均值为1.28 MPa，未粘贴时密封垫间平均接触应力为1.13 MPa，未粘贴与粘贴牢固工况相比，密封垫间接触应力降低11.7%，远小于梳型的25.8%，说明底部平型密封垫结构更为稳定，粘贴质量对密封垫间防水性能影响较小，具体如图12所示。

粘贴牢固时密封垫底部与沟槽平均接触应力1.52 MPa，当密封垫未粘贴固定时，平均接触应力为1.32 MPa。底部平型密封垫在两种工况下，密封垫间接触应力都是小于密封垫与沟槽间接触应力，即密封垫防水薄弱环节为密封垫间接触面，具体如图13所示。

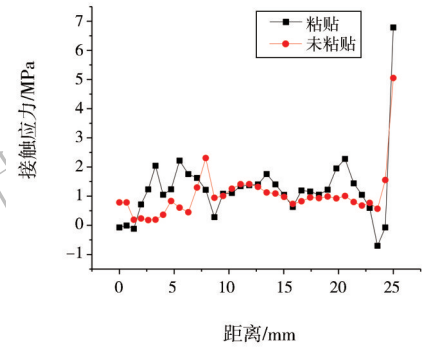


图12 平型密封垫间接触应力

Fig.12 Contact stress between flat gaskets

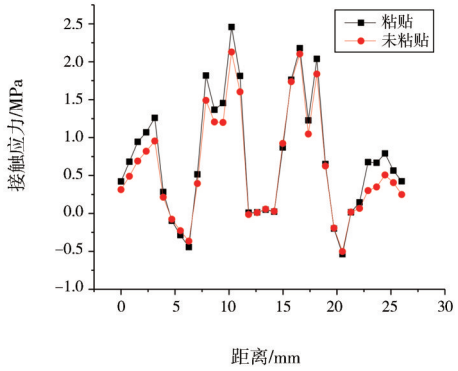


图13 平型密封垫与沟槽接触应力

Fig.13 Contact stress between flat gasket and groove

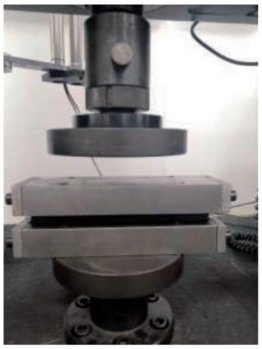


图14 压缩试验装置

Fig.14 Compression test device

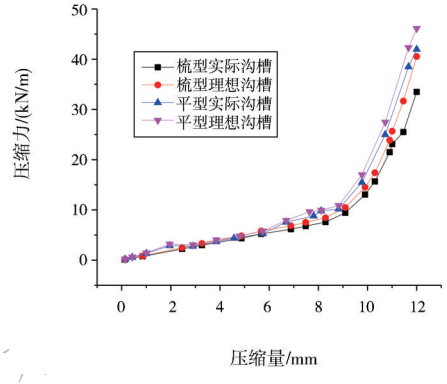


图15 压缩曲线

Fig.15 Compression curves

5 密封垫压缩和防水性能试验研究

5.1 沟槽对橡胶密封垫装配力影响研究

参考《高分子防水材料 第4部分:盾构法隧道管片用橡胶密封垫》(GB 18173.4—2010)试验规程,分别按照理论沟槽和实际沟槽尺寸,加工橡胶密封垫压缩试验装置(图14)。针对梳型密封垫和平型密封垫,分别在理论沟槽和实际沟槽情况下,开展密封垫压缩试验。

如图15所示,密封垫压缩量达到9 mm时,四种工况下装配力曲线基本相同,完全压缩时(压缩量为12 mm),梳型密封垫理论沟槽最大装配力为40.5 kN/m,实际沟槽最大装配力为33.4 kN/m,平型密封垫理论沟槽最大装配力为46.1 kN/m,实际沟槽最大装配力为41.6 kN/m。实际沟槽情况下,密封垫的压缩应力有所降低,主要是压缩过程中,部分密封垫压缩到两侧管片间隙中,造成密封垫实际截面系数增大,从而降低密封垫装配力,与第3节数值计算结果接近。

在实际沟槽情况下,梳型密封垫与平型密封垫相比,最大装配力降低24.5%,主要是压缩过程中梳型密封垫易倾倒,造成装配力降低。

5.2 粘贴质量对密封垫防水能力影响研究

为研究密封垫在极限工况下的防水能力,针对底部平型和梳型,粘贴和未粘贴工况,开展T字缝双道密封垫耐水压试验。装置的沟槽尺寸及几何形状与实际管片一致,密封垫上设置双道沟槽,如图16所示。在0.1 MPa下保持30 min,当不漏水则以0.1 MPa为一个单位逐级往上加,每加一个单位,保持30 min,最终加到设计水压后保压24 h。

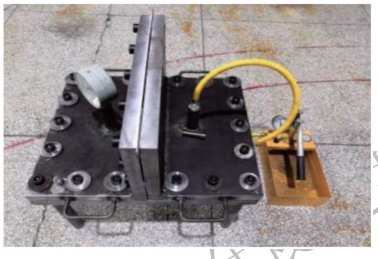


图16 双道密封水压装置

Fig.16 Double-channel water pressure resistance device

如图17所示，在设计张开量为3 mm，错位5 mm工况下，梳型密封垫未粘贴时，最大防水能力为1.12 MPa，粘贴牢固时防水能力为1.25 MPa，粘贴能使梳型密封垫压缩过程中结构稳定，提高密封垫的防水能力；平型密封垫未粘贴时最大防水能力1.24 MPa，粘贴牢固时最大防水1.3 MPa，防水能力增加数值较小，主要是平型断面压缩过程中结构较为稳定，粘贴质量对结构稳定性影响较小。

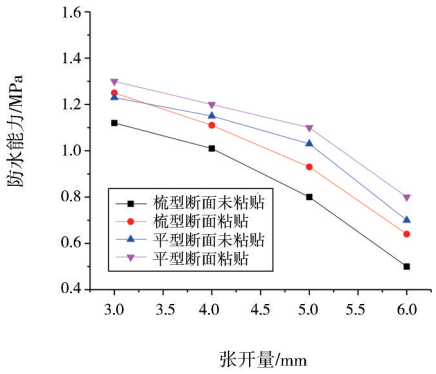


图17　防水试验曲线

Fig.17　Waterproof test curve

6　结　论

（1）橡胶密封垫压缩过程中易向两侧管片间隙中变形，使沟槽内实际橡胶断面减小，从而降低密封垫接触面接触应力。设计时应对密封垫结构进行优化，控制密封垫压缩过程中向外变形。

（2）底部梳型密封垫粘贴固定时，密封垫间接触面是接头防水薄弱点；当未粘贴时，密封垫间接触应力与粘贴固定相比降低了25.8%，且防水薄弱环节为密封垫底部与沟槽接触面，因此应加强梳型密封垫现场防水施工质量控制。

（3）底部平型密封垫与梳型密封垫相比结构更为稳定，即使在粘贴不牢固的情况下，也能维持较好的应力水平，但装配力增加24.5%，不利于管片拼装。同时管片拼装力过大容易导致密封垫角部出现挤堆而渗漏。若采用底部平型橡胶密封垫，密封垫的最大拼装力应控制在拼装机可压缩范围内，同时通过密封垫减阻，加筋等方式控制密封垫变形，控制密封垫角部挤堆，提高隧道防水能力。

参考文献

References

[1] 肖明清,薛光桥,钟 元,等. 盾构法隧道管片接缝双道密封垫防水试验研究[J]. 铁道工程学报,2021,38(2):85-91.
XIAO Mingqing, XUE Guangqiao, ZHONG Yuan, et al. Experimental Study on Waterproofing of Double-channel Gaskets in the Joints of Shield Tunnel Segments[J]. Chinese Journal of Railway Engineering, 2021, 38(2): 85-91.

[2] 郭 忠, 林志军, 江 河,等. 大直径越江盾构隧道防水密封垫角部构造优化试验研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(7):1180-1187.
GUO Zhong, LIN Zhijun, JIANG He, et al. An Experimental Study on Improvement of a Waterproof Sealing Gasket Corner Structure for a Large-diameter River-crossing Shield Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(7): 1180-1187.

[3] GONG C, DING W, SOGA K, et al. Sealant Behavior of Gasketed Segmental Joints in Shield Tunnels: An Experimental and Numerical Study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77: 127-141.

[4] 李 拼,谢宏明,何 川,等. 基于有效接触应力的大张开量盾构隧道密封垫防水性能分析[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(12):1993-1999.
LI Pin, XIE Hongming, HE Chuan, et al. Waterproof Performance Analysis of Water Sealing Gasket of Large Open Shield Tunnel Based on Effective Contact Stress[J]. Tunnel Construction, 2019,39(12):1993-1999.

[5] 钟元元, 刘丽伟. 超埋深大直径盾构管片接缝防水探讨[J]. 隧道与轨道交通,2019(增1):39-43.
ZHONG Yuanyuan, LIU Liwei. Discussion on the Waterproofing of the Joints of Shield Tunnel Segments with Ultra-buried Depth and Large Diameter[J]. Tunnel and Rail Transit, 2019(S1):39-43.

[6] 罗 驰,杨新安,雷震宇. 盾构隧道橡胶密封垫压缩蠕变试验研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(2):1-8.
LUO Chi, YANG Xin′an, LEI Zhenyu. Experimental Study on Compression Creep of Rrubber Gaskets in Shield Tunnels[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018,35(2):1-8.

[7] SHALABI F I, CORDINg E J, Paul S L. Concrete Segment Tunnel Lining Sealant Performance under Earthquake Loading[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 31:51-60.

[8] DING W, GONG C, MOSALAM K M, et al. Development and Application of the Integrated Sealant Test Apparatus for Sealing Gaskets in Tunnel Segmental Joints[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63:54-68.
[9] 张稳军, 丁 超, 张高乐, 等. 盾构隧道管片接缝复合型密封垫选型设计研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(2): 246-255.
ZHANG Wenjun, DING Chao, ZHANG Gaole, et al. Type Selection and Design of Composite Sealing Gasket for Segment Joints of Shield Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(2): 246-255.
[10] 陈云尧,张军伟,马士伟,等. 盾构隧道管片接缝密封垫设计参数研究[J]. 现代隧道技术,2020,57(4):59-66.
CHEN Yunyao, ZHANG Junwei, MA Shiwei, et al. Study on Design Parameters of Seals for Segment Joints of Shield Tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(4): 59-66.
[11] 叶美锡, 丁文其, 陈俊伟, 等. 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(增2):200-206.
YE Meixi, DING Wenqi, CHEN Junwei, et al. Sensitivity Analysis of Influencing Factors on Mechanical Properties of EPDM Sealing Gaskets of Segment Joint of Shield Tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019,39(S2):200-206.
[12] 王 旭, 孟庆余. 水下盾构隧道管片接缝防水密封垫截面设计研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(10):172-178.
WANG Xu, MENG Qingyu. Research on Sectional Design of Waterproof Gasket for Submerged Shield Tunnel Segment Joints [J]. Railway Standard Design, 2021,65(10):172-178.

Research on the Waterproof Performance of Segment Rubber Gasket Considering the Groove Boundary and Paste Quality

HE Chuangbo[1,2,3] *XU Chao*[1,2,3] *YANG Zhao*[1,2,3] *LIU Pengfei*[1,2,3] *ZHENG Jiajia*[4] *GAO Ruchao*[1,2,3]
(1. CCCC Second Harbour Engineering Company Ltd., Wuhan 430040; 2. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040;
3. Key Laboratory of Large-Span Bridge Construction Technology, Wuhan 430040;
4. China Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Beijing 100011)

Abstract: Aiming at the structure of the bottom flat and comb-shaped rubber gaskets, finite element software was used to establish a three-dimensional calculation model, to carry out research on the impact of gasket grooves and paste quality on the waterproof performance of gaskets, to explore the weak points of gaskets in waterproofing, and to carry out physical modeling test for verification. The research results show that: (1) During the compression process of the rubber gasket, it is easy to deform into the gap between the segments on both sides, which reduces the actual area in the groove and reduces the waterproof ability of the gasket. (2) When the bottom comb-shaped gasket is pasted and fixed, the contact surface between the gaskets is the weak point of waterproofing of the joint; when it is not pasted, the contact stress between the gaskets is reduced by 25.8% compared with that of pasting and fixing, and the weakest waterproof point is the contact surface between the bottom of the gasket and the groove. (3) When the flat gasket is not pasted, the structure in the compression process is relatively stable, and the quality of the pasting has little effect on the waterproof of the gasket.

Keywords: Shield tunnel; Rubber gasket; Flat; Comb-shaped; Groove; Contact stress