

文章编号:1005-0523(2016)04-0045-05

盾构管片橡胶密封垫断面形式设计及耐久性研究

丁 杨¹, 孟 伟², 邓文武²

(1.华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013;2.中铁第六勘察设计院集团有限公司城市轨道交通设计院,天津 300308)

摘要:由于密封垫的使用寿命对今后隧道工程有着重要的工程意义;因此,对比不同密封垫材料的优缺点,根据规范对尺寸的规定,选取合适的盾构管片橡胶密封垫材料(EPDM)和3种尺寸分别进行防水试验。得出的结论是:当橡胶密封垫的接触应力与设计水压力之比 $K \geq 1.15$ 时能满足防水要求。针对目前盾构隧道管片接缝弹性密封垫以经验为主的设计思路,提出利用数值模拟手段,将第3种试验产品的耐久性实验所得的数据利用“阿累尼乌斯方程”的“ $P-T-t$ 三元模型”进行橡胶密封垫使用寿命预测。所得出的结论是:橡胶密封垫在使用100年后其应力保持率为83.3%。第3次试验所用橡胶密封垫的短期防水压力最高达到1.8 MPa,通过计算可知使用100年后该断面尺寸橡胶密封垫的防水压力为: $1.8 \times 83.3\% = 1.5$ MPa,满足0.4 MPa的长期防水指标。研究表明“阿累尼乌斯方程”的“ $P-T-t$ 三元模型”能够很好地解决密封垫的使用寿命问题,具有较好的推广应用前景。

关键词:三元乙丙橡胶;盾构隧道;断面设计;耐久性

中图分类号:TU433

文献标志码:A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.04.007

盾构隧道管片接缝处易发生漏水,是盾构隧道防水设计中最为关键的环节,在所有管片接缝防水的措施中,密封垫防水是最为重要也是最为可靠的,是防水的重点^[1]。近年来,对密封垫的使用寿命研究越来越多^[2-5],但利用“阿累尼乌斯方程”的“ $P-T-t$ 三元模型”进行预测使用寿命较少。本文结合苏埃隧道通道工程,设计3种不同规格的密封垫,依据实验设备对3种密封垫层进行渗透性实验,对符合实验的产品,利用已有数学模型“阿累尼乌斯方程”的“ $P-T-t$ 三元模型”,计算与预测其耐久性,计算的结果与在实验所模拟的结果误差不大;因此,所采用的模型可以对今后密封垫的耐久性进行预测。

1 工程概况及盾构管片确定

1.1 盾构管片接缝防水形式的确定

拟建苏埃通道盾构段的最大水头为40 m,单、双道弹性密封垫均有实例,比本隧道埋深稍大一点的上海崇明隧道采取了单道三元乙丙(EPDM)橡胶密封垫,德国易北河第四座道路隧道采用了双道弹性密封垫。

因此,从工程经济角度考虑,拟建苏埃通道盾构管片接缝防水可采取单道EPDM橡胶弹性密封垫做为主防水线,外侧黏贴遇水膨胀橡胶止水条做为辅助防水线的防水措施。

1.2 盾构管片橡胶密封垫材料的确定

通过表1的对比可知,通常隧道工程均采用单一的EPDM橡胶或者EPDM橡胶顶部搭相遇水膨胀橡胶的弹性密封垫,且使用单一的EPDM橡胶做为密封垫的居多;因此,从材料的耐久性和耐腐蚀性出发,苏埃通道盾构管片接缝橡胶密封垫拟采用单一的做为弹性密封垫的材料^[6]。

收稿日期:2016-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51168015)

作者简介:丁杨(1992—),男,硕士研究生,研究方向为材料结构工程。

表 1 盾构管片橡胶密封垫材料
Tab.1 Shield rubber gasket materials

材 质	优 点	缺 点
三元乙丙橡胶	耐久性能好,物质析出少;生产工艺成熟,已经普遍应用,耐久性、耐腐蚀性较好。	接触应力长期衰竭明显,防水能力增长的同时,拼装闭合压缩力也同时增大,直接影响到管片的拼装。
遇水膨胀材料	施工初期拼装压力小,遇水膨胀后可补偿应力松弛损失。	产品质量参差不齐,物质析出难控制,若膨胀率过大,则容易从沟槽中脱落失效。耐久性、耐腐蚀性较差。

2 橡胶密封垫试验设计与确定

2.1 橡胶密封垫防水机理分析

设盾构管片承受的最大水压力为 σ_w , 橡胶密封垫初始接触面压应力与自封作用产生的接触面压应力之和为 σ_r , 橡胶密封垫防水机理如图 1。橡胶密封垫防水条件^[7]为

1) 橡胶密封垫初始接触面压应力与自封作用产生的接触面压应力之和 σ_r 应大于设计水压力 $a \cdot \sigma_w$, 其中 a 为安全系数。

2) 橡胶密封垫材料由于随时间的变化产生应力松弛和老化而导致接触面应力降低;因此长时间内接触面应力应不低于管片承受的最大水压力。

所以盾构管片接缝橡胶密封垫防水应满足以下公式:

- 1) 短期防水条件: $\sigma_r \geq a \cdot \sigma_w$;
- 2) 长期防水条件: $\sigma_r \geq \sigma_w$ 。

2.2 橡胶密封垫室内试验确定

拟建苏埃隧道盾构段管片接缝弹性橡胶密封垫应满足如下几点^[8]:

- 1) 作为橡胶材料,苏埃隧道盾构段管片接缝弹性密封垫的材料性能要求应满足相关国家标准要求。
- 2) 在千斤顶推力和管片拼装的作用力下,不致使管片端面和角部损伤等弊病发生,同时弹性密封垫应方便管片拼装。
- 3) 对止水所需的接触面压力,设计时应考虑接缝的张开量和错位量;并在设计确定的耐水压力下不出现渗漏。
- 4) 满足在海水环境下工作 100 年不失效的耐久性要求。

3 盾构管片橡胶密封垫尺寸的确定方法

3.1 橡胶密封垫尺寸的相关规定

管片接缝密封垫应被完全压入密封垫沟槽内,密封垫沟槽的截面积应大于或等于密封垫沟槽的截面积,其关系宜符合:

$$A = (1 \sim 1.15) A_0 \quad (1)$$

式中: A 为密封垫沟槽的面积; A_0 为密封垫的面积。

3.2 橡胶密封垫宽度的确定方法

密封垫接触面的宽度应为最大错位量的 3 倍左右,见式(2):

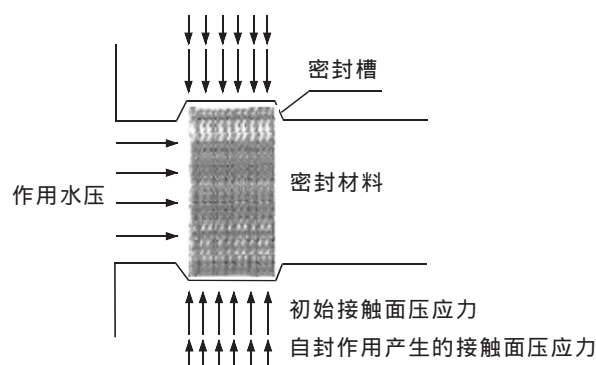


图 1 橡胶密封垫防水机理示意图
Fig. 1 Waterproof mechanism of rubber sealing

$$B=3S \quad (2)$$

式中: B 为密封垫的宽度; S 为最大错位量。

3.3 橡胶密封垫高度的确定方法

密封垫的高度应考虑应力松弛和老化的影响,并在最大张开量时,满足设计防水压力所需要接触面压力^[9]。参照图2,橡胶密封垫沟槽深度与密封垫的高度按照(3)(4)式计算:

$$\varepsilon_{\max} = (h-d)/h \quad (3)$$

$$\varepsilon_{\min} = (h-d-\frac{\delta}{2})/h \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{\max}$ 为弹性密封垫的最大压缩率,即压至接缝张开量为 0 mm 时的压缩率,为设计所定。一般不小于 40%; $\varepsilon_{\min}$ 为弹性密封垫最小压缩率,为设计所定,一般不小于 25%; δ 为设计的接缝允许张开量; d 为要求的密封垫沟槽深; h 为要求的弹性密封垫高度。

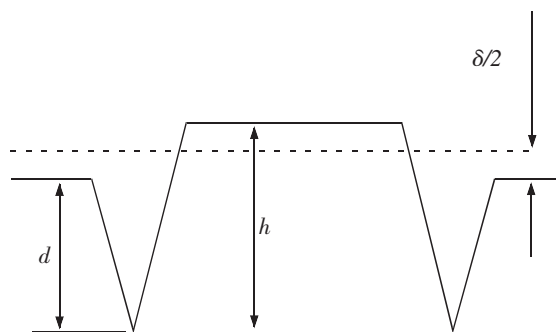


图2 橡胶密封垫沟槽、密封垫形状断面示意

Fig.2 Rubber sealing gasket groove, seal pad shape section

4 橡胶密封垫使用寿命预测

对于盾构密封垫使用寿命的预测,目前国内外通常采用热氧加速老化的方式进行预测。认为橡胶密封垫的自然老化与热氧加速老化相仿,都服从于“阿累尼乌斯方程”;因此目前推测橡胶密封垫使用寿命通常通过基于“阿累尼乌斯方程”的“三元模型”^[10]。

4.1 橡胶密封垫使用寿命预测模型简介

老化性能指标(P)与老化温度(T)和老化时间(t)三者的关系可以用公式表示^[11]:

$$\log \left\{ \sim \log \left(\frac{P}{B} \right) \right\} = b_0 + b_1 \log t + b_2 \frac{1}{T} \quad (5)$$

式中: P 为老化系数,对于应力松弛试验为老化后的应力与初始应力的比值; B 为接近于 1 的常数; t 为老化时间; d ; T 为老化试验温度, K; b_0, b_1, b_2 为待定系数。

利用二元回归即可求出 b_0, b_1, b_2 的值,待定参数 B 可以通过逐次逼近方法求得。

4.2 橡胶密封垫耐久性实验

橡胶密封垫耐久性实验数据如表2,表3所示。

表2 橡胶试样老化后应力保持系数

Tab.2 Stress retention coefficient of rubber sample after aging

老化时间/h	老化温度/K					
	343.15		363.15		383.15	
	试样 1	试样 2	试样 1	试样 2	试样 1	试样 2
0	1	1	1	1	1	1
3	0.978	0.917	0.966	0.859	0.818	0.875
18	0.953	0.884	0.945	0.833	0.783	0.852
21	0.914	0.809	0.915	0.82	0.759	0.793
36	0.875	0.799	0.859	0.768	0.722	0.757

将老化后的数据带入“ $P-T-t$ ”三元数学模型,利用软件进行二元回归求解出 b_0, b_1, b_2 ,并利用逐次逼近法求出参数 B ,各参数的值如表3所示。

表 3 各个参数值
Tab.3 Parameter values

参数	b_0	b_1	b_2	B
数值	2.995	0.292	-1 521.43	0.951

将表 3 数据带入公式(5)中,可得: $P=0.833$ 。可以认为,橡胶密封垫在使用 100 年后其应力保持率为 83.3%。第 3 次试验所用橡胶密封垫的短期防水压力最高达到 1.8 MPa,通过计算可知使用 100 年后该断面尺寸橡胶密封垫的防水压力为: $1.8 \times 83.3\% = 1.5$ MPa,满足 0.4 MPa 的长期防水指标。

5 结论

针对盾构隧道橡胶密封垫设计难点,通过实验结果来进行对比,从而进行断面形式设计。设计时需满足各项基本要求,其中验算耐久性建立了寿命预测模型,验算是否满足所建立的公式,根据实验可得以下结论:

1) 密封垫硬度在密封垫压缩全过程中均起到重要作用,硬度越大,密封垫防水能力越强。较小的硬度改变会带来密封垫防水能力的巨大变化。

2) 密封垫沟槽体积填充率随接缝张开量的减少对防水能力的贡献逐渐增加。当张开量较小时,较小的体积填充率变化可带来防水能力的大幅提高;张开量较大时,体积填充率对橡胶密封垫防水能力影响不大。

参考文献:

- [1] 王民. 隧道盾构施工管片橡胶密封垫的材料和结构及产品性能特性[J]. 特种橡胶制品, 2005, 26(1): 42-46.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 赵运臣, 肖龙鸽, 刘招伟, 等. 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.
- [5] 樊庆功, 方卫民, 苏许斌. 盾构隧道遇水膨胀橡胶密封垫止水性能试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2002, 22(4): 335-338.
- [6] 冯晓燕. 广州地铁二号线越-三区间隧道盾构工程衬砌管片接缝防水技术[J]. 现代隧道技术, 2002(5): 20-22.
- [7] 蔡光伟, 蔡文胜. 复杂地质条件下盾构法隧道施工防水、防腐及防迷流技术[J]. 铁道建筑技术, 2012(9): 64-66.
- [8] 张勇, 贾逸. 南京轨交 10 号线越江段盾构法隧道管片弹性密封垫设计研究[C]//中国土木工程学会隧道及地下工程分会防水排水专业委员会学术交流会, 宁波, 2013: 27-33.
- [9] 周建军, 贺维国. 汕头苏埃通道盾构设计施工关键技术探讨[C]//海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会, 广州, 2013.
- [10] 李永刚. 盾构法隧道管片接缝防水橡胶密封垫研制[J]. 特种橡胶制品, 2010, 31(6): 51-54.
- [11] 彭钧. 地铁盾构结构设计方法探讨[J]. 华东交通大学学报, 2011, 28(4): 38-41.

Study on Durability and Section Design of Sealing Rubber Pad of Shield Segment

Ding Yang¹, Meng Wei², Deng Wenwu²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Urban Rail Transit Design Institute, Sixth Survey and Design Institute of China Railway Group Co., Ltd., Tianjing 300308)

Abstract: The service life of sealing pads is of great significance for future tunnel engineering. This study, in order to compare advantages and disadvantages of different sealing pad materials, selects shield segment rubber sealing pad materials (EPDM) of three suitable dimensions according to size specifications in the provisions, and then conducts waterproof tests respectively. It concludes that when the ratio of contact stress of the rubber seal to the designed water pressure is $K \geq 1.15$, the water pressure can be satisfied. The durability experimental data for the third test is used to predict the service life for the rubber sealing pad by “ $P-T-t$ ternary model” of the Arrhenius equation. Results are as follows: the stress retention rate is 83.3% after the rubber seal pad has been used for 100 years. For the third test of rubber sealing pad, the short-term waterproof pressure peaks at 1.8 MPa, and the waterproof pressure for the rubber sealing pad section is $1.8 \times 83.3\% = 1.5$ MPa after a hundred years' use through calculation, which could meet the long-term waterproof index. The study proves that “ $P-T-t$ ternary model in Arrhenius equation can well solve the sealing problem of the service life of the pad, and has a good prospect of application.

Key words: ethylene propylene diene copolymer rubber; shield tunnel; section design; durability

(责任编辑 刘棉玲)