

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.01.017

# 盾构隧道管片接缝密封垫防水耐久性试验研究

王媛<sup>1,2</sup>, 周峰<sup>2,3,4</sup>, 陈龙<sup>2,3,4</sup>, 任杰<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;

3. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098; 4. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098)

**摘要:** 为研究盾构管片接缝橡胶密封垫的防水耐久性, 开展了橡胶密封垫水热加速老化试验, 并对老化后试样进行拉伸力学性能试验、试样表面电镜扫描与长期防水性能试验, 分析了橡胶垫表面微观尺度下的防水失效机理; 采用橡胶密封垫极限防水压力为耐久性评价指标, 结合基于 Arrhenius 方程的  $p-T-t$  数学模型, 推导了橡胶密封垫长期防水性能折减系数的预测公式。结果表明: 老化后橡胶密封垫表面接触状况的恶化和橡胶材料的硬化, 加速了橡胶密封垫接触面间渗漏通道的形成; 橡胶密封垫防水性能随着老化时间的增加不断降低, 但下降速度逐渐减小。采用提出的防水性能预测公式对广东榕江-关埠引水工程盾构隧洞实际使用的橡胶密封垫的耐久性进行了预测, 预测服役 100 a 后的老化系数为 0.390, 结果相对于仅考虑橡胶材料力学性能时的预测结果偏小 12.36%, 对原设计使用期内频繁出现的渗漏现象提供了合理解释与更准确的寿命预测。

**关键词:** 盾构隧道; 接缝防水; 橡胶密封垫; 水热老化; 失效机理; 耐久性预测

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)01-0129-09

## Experimental study on waterproof durability of sealing pad for segment joint of shield tunnel

WANG Yuan<sup>1,2</sup>, ZHOU Feng<sup>2,3,4</sup>, CHEN Long<sup>2,3,4</sup>, REN Jie<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Aiming at the durability problem of waterproof gasket for segment joints of shield tunnel, the hydrothermal accelerated aging test of rubber gasket was carried out. The tensile mechanical performance test of the aging sample, the scanning electron microscope test of the contact surface and the long-term waterproof performance test were carried out. Thereafter, the waterproof failure mechanism of the rubber gasket surface was analyzed at the microscopic scale. The ultimate waterproof pressure of the gasket was used as the durability evaluation index. Combined with the "P-T-t" ternary model based on the Arrhenius equation, the reduction formula of the aging waterproof performance of the gasket was deduced. The results showed that: the deterioration of the contact condition of the sealing pad surface and the hardening of the rubber material accelerate the formation of the leakage channel between the contact surface of the sealing pad; the waterproof performance of the gasket decreases with the increase of aging time, but the decline rate decreases gradually; taking the rubber gasket used in the shield tunnel of Rongjiang-Guanbu Diversion Project in Guangdong as an example, the durability prediction results using the proposed prediction formula of waterproof performance are 12.36% smaller than those only considering the mechanical properties of rubber materials, and the aging coefficient is 0.390 after 100 years of service, which provides reasonable explanation and more accurate life prediction for the frequent leakage phenomenon in the service life of original design.

**Key words:** shield tunnel; joint waterproofing; rubber gasket; hydrothermal aging; failure mechanism; durability prediction

基金项目: 国家自然科学基金(U1765204)

作者简介: 王媛(1969—), 女, 教授, 博士, 主要从事渗流理论与测试研究。E-mail: wangyuanhhu@163.com

通信作者: 任杰(1991—), 男, 讲师, 博士, 主要从事地下与隧道工程水灾害防治研究。E-mail: renjiehhu@163.com

引用本文: 王媛, 周峰, 陈龙, 等. 盾构隧道管片接缝密封垫防水耐久性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 129-137.

WANG Yuan, ZHOU Feng, CHEN Long, et al. Experimental study on waterproof durability of sealing pad for segment joint of shield tunnel[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(1): 129-137.

盾构隧道衬砌由多个管片和大量接缝组成,管片接缝防水性能劣化会引发渗水问题,进而引起隧道结构损伤、地表塌陷等一系列次生灾害,严重影响了隧道的运行安全<sup>[1-2]</sup>。盾构隧道防水以接缝防水为重点,弹性橡胶密封垫作为管片接缝防水体系的主体,因服役时间增长引发的橡胶密封垫耐久性问题的在接缝防水设计中日益突出<sup>[3]</sup>。

20世纪90年代以来,盾构隧道接缝橡胶密封垫长期防水性能研究主要围绕三方面展开:橡胶材料的长期性能预测与寿命评估、不同接触状况下的短期防水性能试验和橡胶材料的老化及行为机理分析。关于盾构隧道接缝橡胶密封垫的长期性能预测研究,目前普遍采用基于时温等效原理的短期高温加速老化试验模拟橡胶的长期服役过程<sup>[4]</sup>。李咏今等<sup>[5]</sup>指出基于 Arrhenius 方程和动力学方程的  $P-T-t$  数学模型是当前应用最广泛的橡胶材料性能预测理论。在橡胶材料老化性能预测的指标选取方面,已有研究一般选取橡胶材料的压缩弹性模量<sup>[6]</sup>、拉断永久变形<sup>[7]</sup>和断裂伸长率等<sup>[8-10]</sup>作为橡胶材料的基础性能劣化指标。虽然以上指标具有容易通过试验获取、能够反映橡胶材料的力学特性的耐久性演化规律的优点,但是管片接缝橡胶密封垫截面构型往往比较复杂,防水性能除了受到材料本身力学性能衰减的影响,还与橡胶密封垫间接触状况与橡胶垫与沟槽之间作用力密切相关,因此需要综合考虑橡胶材料的力学性能衰减与橡胶垫防水性能的衰减影响。在橡胶密封垫防水性能试验方面,董林伟等<sup>[11-12]</sup>通过防水性能试验和有限元法综合分析了接触面积、材料弹性模量、管片螺栓参数等因素对橡胶密封垫防水性能的影响,并对橡胶密封垫的表面接触压应力进行了理论推导和防水作用机理分析。但以上研究主要分析橡胶密封垫的短期防水性能,缺乏对老化后橡胶密封垫防水性能的测试以及表面防水失效微观机理的研究。

在橡胶密封垫老化行为机理研究方面,由于隧道管片接缝工作环境基本为地下,因此橡胶密封垫与氧气的接触有限。丁玉乔等<sup>[13]</sup>探究了水浴加速老化后的橡胶材料的老化行为和机理;沈佳佳等<sup>[8,14]</sup>根据橡胶材料水热老化后力学性能变化规律,提出了用于管片接缝橡胶材料的时变本构模型。在橡胶密封垫表面渗漏影响因素方面,孙昕等<sup>[15]</sup>基于室内模型试验与数值模拟,得出在气体微弱泄漏阶段,影响接缝面气体泄漏率的主因是粗糙程度,表面越粗糙,气体泄漏率越大。张亚洲<sup>[16]</sup>针对橡胶密封垫表面涂抹润滑剂及沾水等多种工作状态下的防水能力进行研究,结果表明在评估橡胶密封垫防水能力时应考虑橡胶密封垫表面工作状态的影响。以上研究均未考虑因橡胶密封垫表面粗糙破损程度而导致的接缝长期防水能力问题。因此,有必要通过试验研究橡胶密封垫微观尺度下的防水失效机理,为进一步优化橡胶密封垫的长期防水性能预测提供依据。

本文对橡胶密封材料开展了水热加速老化试验,借助电镜扫描对试验后橡胶密封垫的表观形貌进行观测,并通过拉伸试验与老化防水性能试验,综合分析了橡胶垫接触面微观防水失效机理、拉伸力学性能劣化规律及老化进程对密封止水结构极限防水压力的影响,结合 Arrhenius 方程的  $p-T-t$  数学模型,给出考虑表面形貌劣化的橡胶密封垫长期防水性能折减系数公式,探究了接缝防水橡胶密封垫的耐久性演化规律。

## 1 橡胶密封垫老化试验

### 1.1 试验材料

试验采用与广东榕江-关埠引水工程输水隧洞所用橡胶密封垫一致的标准三元乙丙 (EPDM) 橡胶试样,试样片材由衡水市众信诚橡胶制品厂提供,主要性能指标:硬度  $H=62\pm 5^\circ$ 、拉伸强度  $T_s \geq 10.5 \text{ MPa}$ 、拉断伸长率  $E_b \geq 350\%$ 、防霉等级大于等于 1 级、热加速老化  $70^\circ\text{C} \times 96 \text{ h}$  的硬度变化  $\Delta H \leq +6^\circ$ 、热加速老化  $70^\circ\text{C} \times 96 \text{ h}$  的拉伸强度变化  $\Delta T_s T_s^{-1} \geq -15\%$ 、热加速老化  $70^\circ\text{C} \times 96 \text{ h}$  的拉断伸长率变化  $\Delta E_b E_b^{-1} \geq -30\%$ 。

为获取同一橡胶材料的力学性能与防水性能,按照规范<sup>[17]</sup>制备 2 种试样,其中哑铃 1 型(试验长度  $(25 \pm 0.5) \text{ mm}$ ,厚度  $(2 \pm 0.2) \text{ mm}$ )试样用于拉伸试验,矩形橡胶密封垫试样用于长期防水性能试验。试验前将各试样编号,编号规则为“温度-时间-组内序号”。328 K ( $55^\circ\text{C}$ ) 温度下老化 24 h 工况所用的 3 个试样以及试验用裁刀如图 1(a) 所示,矩形橡胶密封垫试样尺寸及剖面构造如图 1(b) 所示。

### 1.2 试验方案

为实现水浴加速老化效果并保持试验数据的稳定性,根据规范<sup>[18]</sup>选取对橡胶密封垫老化作用影响最大的温度  $T$  和时间  $t$  两个变量进行老化试验方案设计。试验设置 3 个老化温度 (328 K、343 K、358 K), 5 个老化时间 (0 h、24 h、48 h、72 h、96 h 和 168 h) 共计 15 种工况。使用 HH-600 型电热恒温水浴槽,分别对哑铃 1 型试

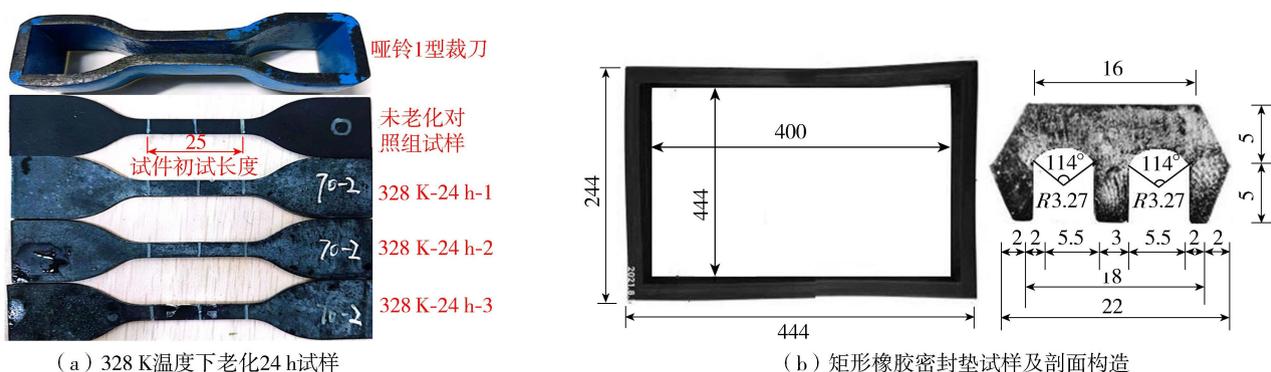


图 1 橡胶材料试样(单位:mm)

Fig.1 Rubber material sample(unit: mm)

样和矩形橡胶密封垫试样进行水热加速老化(图 2),模拟地下水环境下的橡胶密封垫的老化过程。

为提高试验结果可靠度,各工况均设置 3 组平行试验,将不同工况的橡胶材料恒温水浴老化后取出干燥并保存于室温下,以便开展后续老化表征测试。

### 1.3 橡胶密封垫老化表征测试

橡胶老化过程中会发生各种各样的物理化学变化,因此结构和性能的各种表征方法都可以用于橡胶老化的表征<sup>[19]</sup>。常用的表征方法包括表面形貌观测、物理性能测试、力学性能测定等。

#### 1.3.1 表观形态观测(SEM 扫描)

本文使用日立扫描电镜 SU3500 扫描电子显微镜(SEM)在 15 kV 的加速电压下观察橡胶密封垫表面的微观结构,分析不同老化程度下橡胶密封垫表面的形貌变化,如:颗粒析出、裂缝、孔洞等。试样表面为离子束溅射镀金,镀金层厚度为 1~20 nm。

#### 1.3.2 拉伸力学性能测试

使用万能试验机对老化后的哑铃 1 型橡胶试样进行拉伸力学性能测试,试验仪器型号为 Instron 电子万能试验机 3360 型,如图 3,加载精度为 0.1 N,设置拉伸速度为 500 mm/min。拉伸力学性能测试内容:拉断永久变形  $S_b$ 、拉伸强度  $T_s$ 、拉断伸长率  $E_b$ ;同时记录各试样的载荷-位移曲线。

#### 1.3.3 橡胶密封垫长期防水性能测试

使用一字缝防水试验装置对恒温水浴一定时间的橡胶密封垫进行老化后的极限防水性能试验。依据 GB 18173.4—2010《高分子防水材料》<sup>[20]</sup>自主设计橡胶密封垫一字缝防水测试系统,该系统主要由加压装置和一字缝试验钢模两部分组成,钢模顶部设注水口、排气阀门与压力表。加压装置采用 TK-ST 恒压恒流自动控制系统,精度达到 0.01 MPa,可在加压过程中对密封结构内部水压进行实时记录,防水试验测试系统示意图及主要试验操作步骤见图 4。同时,为使温度、时间成为主导因素,增加长期防水性能试验数据的稳定性,所有老化防水试验均在 8 mm 接缝张开量和不错缝的单一工况下进行。

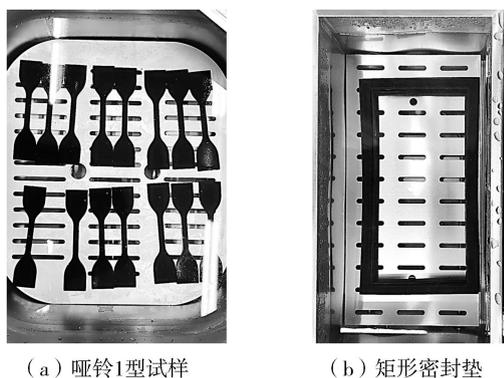


图 2 橡胶密封垫试样恒温水浴老化试验

Fig.2 Aging test of rubber sealing pad samples with thermostat water bath

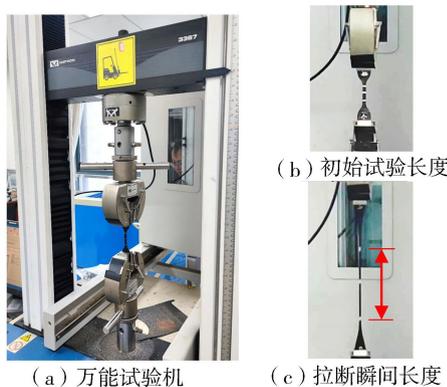


图 3 橡胶材料拉伸试验

Fig.3 Tensile test of rubber materials

## 2 老化表征测试结果

### 2.1 SEM 表观测试

使用 SEM 扫描电镜对水热老化全过程的橡胶密封垫表面进行表观形貌观测,结果见图 5。未老化的橡

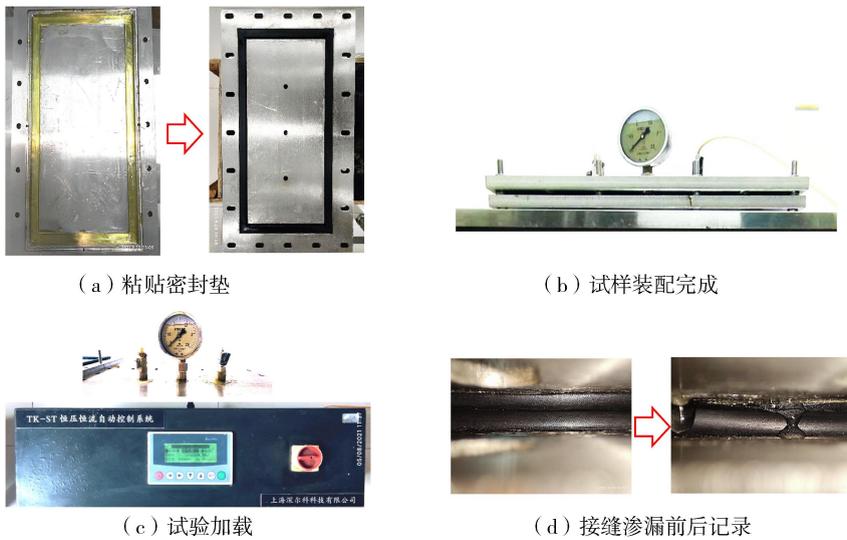


图 4 橡胶密封垫试样防水性能试验

Fig. 4 Waterproof performance test of rubber sealing pad sample

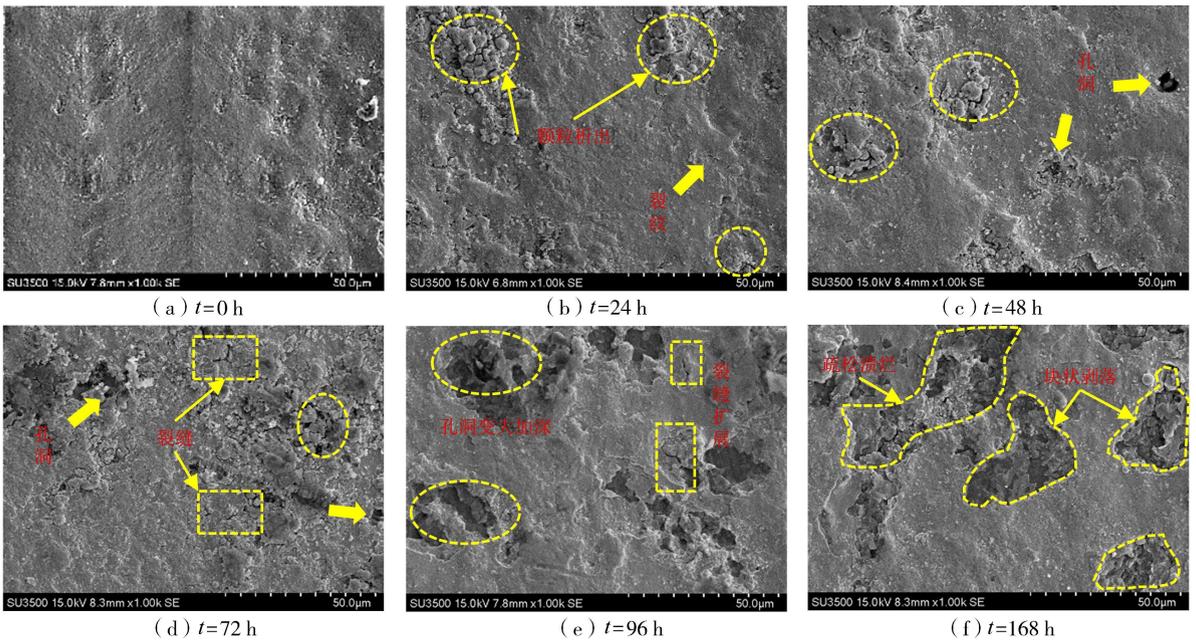


图 5 328 K 试样表面 SEM 扫描图 (  $\times 1\ 000$  倍 )

Fig. 5 SEM scan diagram of 328 K sample surface (  $\times 1\ 000$  times )

胶密封垫表面相对平坦光滑。老化前期 ( 图 5 ( a ) ( b ) ) , 由于橡胶密封垫内部小分子添加剂的分解, 橡胶密封垫表面开始出现固体颗粒物析出现象并伴有裂纹和细小孔洞产生; 老化中期 ( 图 5 ( b ) ~ ( d ) ) , 随着老化时间的延长, 橡胶密封垫表面裂缝增多、变宽, 孔洞内的颗粒物开始脱落, 孔洞扩大变深。在老化后期 ( 图 5 ( d ) ~ ( f ) ) , 橡胶密封垫粗糙度和表面破损的区域占比不断增加, 孔洞周围呈疏松溃烂状。

## 2.2 拉伸测试

通过对拉伸试验结果的处理, 可以得到橡胶老化后的各项拉伸指标: 根据 GB/T 2941—2006《橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序》<sup>[17]</sup>,  $S_b$  为试样断裂后放置 3 min 后的试验长度增量与试样初始试验长度的比值、 $E_b$  为试样断裂时试验长度增量与初始试验长度的比值、 $T_s$  为记录的最大拉力与试件中部断面面积的比值。 $S_b$ 、 $E_b$  和  $T_s$  在各老化温度下随时间的变化曲如图 6 ~ 8 所示。

不同老化程度下试样的  $S_b$  表现出了较为复杂的变化, 如图 6 所示。在 343 K 和 358 K 温度下, 样品的  $S_b$  比初始值显著降低, 且差值随着时间的延长而增加。各温度下试样的  $S_b$  在 72 ~ 96 h 阶段出现了短暂的回升, 达到各试样 0 ~ 24 h 阶段的值, 总体仍呈降低趋势。随着老化时间的增加或温度的升高  $E_b$  呈规律性的

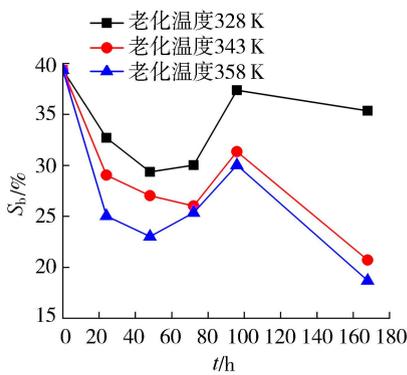


图 6 试样  $S_b$  随时间变化曲线  
Fig. 6 Change curve of  $S_b$  of specimen with time

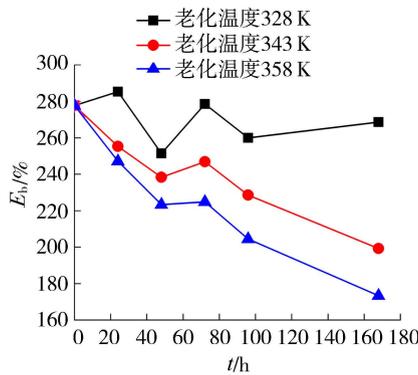


图 7 试样  $E_b$  随时间变化曲线  
Fig. 7 Change curve of  $E_b$  of specimen with time

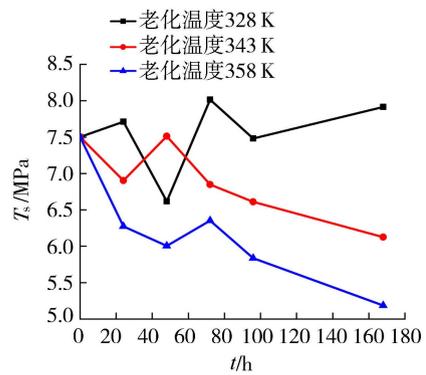


图 8 试样  $T_s$  随时间变化变化  
Fig. 8 Change curve of  $T_s$  of specimen with time

降低趋势(图 7)。

$T_s$  为试样在单轴拉伸时可承受的最大强度值,该指标主要受试样拉断伸长率和弹性模量的影响。如图 8 所示,在老化温度 343 K 和 358 K 下,随着时间的增长  $T_s$  呈下降趋势,在老化温度 328 K 下曲线在 0 ~ 24 h 阶段呈上升趋势,随后下降。在老化时间为 48 ~ 72 h 阶段,  $T_s$  随着  $t$  的增加先增加后降低。 $T_s$  开始上升的时点集中在 48 h 左右,在老化温度 328 K 和 358 K 下,增量转变时点大于 96 h;在老化温度 343 K 下,转变时点在 24 h 和 48 h 之间,且温度越高各曲线斜率越大。

### 2.3 老化防水试验

由图 9 可知,各老化状态下的极限防水压力随着橡胶密封垫老化时间的增加而减小,且下降速度逐渐减小。不同的老化温度下,随着老化时间的增加,橡胶密封垫的防水能力呈明显的下降趋势。在温度 328 K 下,第 24 ~ 96 h 阶段下防水压力近似线性减小,在 96 ~ 168 h 下曲线趋于平缓。在不同老化温度下,橡胶密封垫的防水性能衰减量达到 30%。

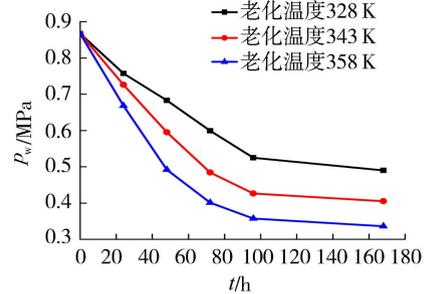


图 9 橡胶密封垫老化极限防水压力变化  
Fig. 9 Change curve of ultimate waterpro of pressure of aging rubber sealing pad

## 3 橡胶密封垫长期防水性能失效机理分析

### 3.1 表面老化微观形貌统计

为定量分析老化作用对橡胶密封垫表面形貌特征的影响,利用 MATLAB 图像处理技术对放大倍率为 100 的橡胶密封垫表面图像进行分析。先将 SEM 扫描图像进行灰度处理,识别图像中各部分的细观特征,并对橡胶密封垫表面发生破损时的临界值进行统计,最终以灰度值小于或等于 75 作为橡胶密封垫表面出现孔洞裂纹等破损情况的阈值。各老化工况下橡胶密封垫的表面情况以  $K_{sd}$  (老化后表面灰度值小于或等于 75 的区域面积在图像总面积中的占比) 作为橡胶密封垫表面破损度系数。

各老化工况下橡胶密封垫  $K_{sd}$  统计结果如图 10 所示。各温度下,随着老化时间的延长,  $K_{sd}$  逐渐增加。由图 5 可知,随着老化反应的进行,橡胶密封垫内部小分子添加剂析出产生孔洞,橡胶分子的氧化逐渐达到平衡,  $K_{sd}$  增加的速度逐渐减小,与未老化试样的表面相比各温度下橡胶密封垫表面的破损程度增加了 8.499% ~ 13.670%。

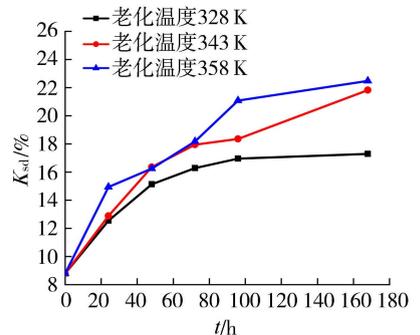


图 10 密封垫表面观形貌统计结果  
Fig. 10 Statistical results of apparent appearance of sealing pad

### 3.2 防水失效微观机理

三元乙丙橡胶材料的老化机理<sup>[13]</sup>:随着老化时间的延长,一方面橡胶密封垫表面硬度不断增加,各温度下橡胶密封垫表面的粗糙、破损程度不断增加,使得原本相对平整的橡胶密封垫接触面状况迅速恶化;另一方面,随着老化时间的延长,橡胶材料的弹塑性性能不断降低,试样变硬、变脆,拉伸强度总体呈降低趋势,最终保持在较低水平。

结合橡胶密封垫实际服役时的防水原理<sup>[11]</sup>,橡胶密封材料防水性能的衰退主要是橡胶密封垫表面接触压力减小导致的,橡胶密封垫接触面在服役时受到管片的竖向挤压力及侧向水压力共同作用。因此,随着老化进程的发展,橡胶密封垫不可避免地会因为表面接触的状况恶化和橡胶密封垫材料内部弹性性能衰减,引起橡胶密封垫接触面应力集中和优势渗漏通道扩展的问题。其中接触面的应力集中又会进一步加剧橡胶材料的老化,这使得多孔橡胶结构原本的挤密防水能力大幅降低,最终导致整个防水密封结构的失效。

## 4 防水耐久性分析

### 4.1 老化系数模型

根据高分子化学反应动力学理论,橡胶材料的老化性能与老化温度、老化时间之间存在着内在的联系。基于 Arrhenius 方程以及  $p-t$  二元模型,建立  $p-T-t$  三元老化系数模型<sup>[4]</sup>。

Arrhenius 方程假设化学反应速率随老化温度的变化关系为

$$\ln K(T) = \ln A - E/RT \quad (1)$$

式中: $K$  为反应速率常数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $A$  为指数因数,  $\text{min}^{-1}$ ;  $R$  为摩尔气体常数,为  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $E$  为活化能,  $\text{J}/\text{mol}$ ;  $T$  为热力学温度,  $\text{K}$ 。

橡胶的老化性能与老化时间的关系可以用  $p-t$  二元数学模型描述。橡胶的老化程度由反应速率常数和老化时间的变化共同决定,即:

$$f_p(t) = B \exp(-Kt) \quad (2)$$

式中: $p$  为橡胶的性能; $f_p$  为老化系数,表示  $p$  的劣化程度; $B$ 、 $r$  为与温度无关的常数。

将式(1)代入式(2),可得:

$$f_p(t, T) = B \exp\{-At' \exp[-E/(RT)]\} \quad (3)$$

利用式(3),当已知实际服役温度和时间即可预测橡胶材料的老化性能。

### 4.2 老化系数指标选取

结合现有的橡胶材料耐久性研究和试验获取的各拉伸力学性能指标,对橡胶材料老化指标的选取进行分析。 $S_b$  要求测量试样拉断重新拼接 3 min 时测量到的长度,易受试验操作的影响产生测量误差; $E_b$  存在受试样个体影响产生离散性偏大的问题<sup>[9]</sup>;  $T_s$  由于受到橡胶内部后交联、断链反应的影响,不同温度和时间下表现出了复杂的变化。由图 7 和图 8 可知,  $E_b$  与  $T_s$  趋势基本保持一致,又因各老化温度下试样的载荷-位移曲线在试样断裂前基本按线性趋势保持稳定(图 11)。

橡胶材料的弹性模量  $E_c$  为试样单轴拉伸时使试样发生单位应变的拉应力的值:

$$E_c = \frac{sL_0}{WD} \quad (4)$$

式中: $s$  为载荷-位移曲线的斜率; $L_0$  为橡胶试件初始试验长度; $W$  为裁刀狭窄部分宽度; $D$  为试验长度部分厚度。

因为水热老化后橡胶试件的拉伸性能会有一定的衰减,定义橡胶材料的相对弹性模量为橡胶密封垫的老化系数: $f_p = E_c/E_{c0}$ ,其中  $E_{c0}$  为未老化橡胶试件的弹性模量。

### 4.3 橡胶密封垫材料老化系数拟合

将橡胶材料  $f_p$ 、 $t$ 、 $T$  代入式(3),使用 Levenberg-Marquardt 优化算法对其进行非线性拟合,得到的拟合系

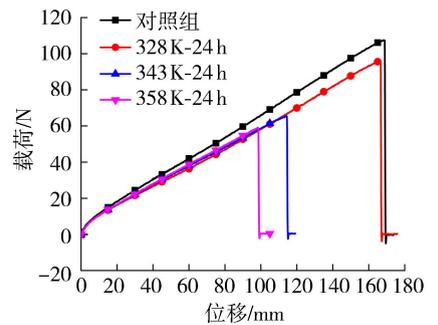


图 11 拉伸载荷-位移曲线

Fig. 11 Tensile load-displacement curve

数值:  $B=1$ 、 $r=0.421$ 、 $A=1843.027 \text{ min}^{-1}$ 、 $E/R=3953.085 \text{ K}$ , 老化系数模型校正决定系数  $R^2=0.983$ 。

由  $R^2$  可知, 参数拟合的精确较高, 将各拟合参数代入式(3), 求解得到基于防水性能试验的老化系数公式。盾构隧道接缝橡胶密封垫长年服役于地下环境, 故可取温度为  $293 \text{ K}$  ( $20^\circ\text{C}$ ), 将  $T=293 \text{ K}$  代入式(3), 此时老化系数公式为

$$f_p(t) = \exp(-0.002548t^{0.421}) \quad (5)$$

式中  $0.002548$  为温度为  $293 \text{ K}$  下的反应速率常数  $K$ 。此时,  $t$  的单位为  $\text{h}$ , 若转换单位为  $\text{a}$ , 则老化系数公式为

$$f_p(t) = \exp(-0.11639t^{0.421}) \quad (6)$$

利用式(6), 可以计算橡胶密封垫在不同服役时间后的老化系数, 最终基于橡胶材料性能劣化的老化系数模型求得的服役  $100 \text{ a}$  老化系数为  $0.445$ 。

#### 4.4 橡胶密封垫长期防水性能折减系数

由橡胶密封垫长期防水性能失效机理分析可知, 橡胶密封垫在实际服役时的防水性能不仅与橡胶材料力学性能有关, 还应考虑老化作用后橡胶密封垫接触面状况和接缝止水结构作用的影响。因此, 有必要在橡胶材料老化系数公式的基础上结合橡胶密封垫的老化防水性能试验, 求解橡胶密封垫的长期防水性能。定义老化后橡胶密封垫极限防水压力  $p_w$  与对照组橡胶密封垫极限防水压力  $p_{w0}$  的比值为橡胶密封垫长期防水性能折减系数指标  $f_{pw}$ , 由老化防水性能试验结果, 计算得到各  $f_{pw}$  (表1)。

以老化系数式(5)为基础, 设长期防水性能折减系数公式为

$$f_{pw}(t) = B_1 \exp(-0.002548t^{r_1}) \quad (7)$$

将表2中各长期防水性能折减系数  $f_{pw}$ 、 $t$ 、 $T$  代入式(7)进行拟合, 得到各长期防水性能折减系数公式对应的参数值为:  $B_1=1$ 、 $r_1=0.432$ , 校正决定系数  $R_1^2=0.993$ 。

此时长期防水性能折减系数公式为

$$f_p(t) = \exp(-0.002548t^{0.432}) \quad (8)$$

将  $t$  的单位转换为  $\text{a}$ , 得长期防水性能折减公式:

$$f_p(t) = \exp(-0.12862t^{0.432}) \quad (9)$$

利用式(9), 可以计算橡胶密封垫在不同服役时间后的长期防水性能折减系数, 在前  $5 \text{ a}$  内折减系数迅速减小至  $0.773$ , 随后减小速率放缓, 橡胶密封垫长期防水性能折减系数随时间变化结果见表2。

以广东榕江-关埠引水工程盾构隧洞实际使用的橡胶密封垫为试样材料, 由防水性能试验测得  $8 \text{ mm}$  时的极限防水压力为  $1.20 \text{ MPa}$ , 而经过渗流场分析可得该隧洞最大外水压力为  $0.6 \text{ MPa}$ 。由于长期防水性能折减系数在橡胶材料力学性能老化基础上考虑了防水试验的结果, 计算得橡胶密封垫使用寿命较仅考虑材料力学性能时降低了  $12.36\%$ , 最终服役  $100 \text{ a}$  折减系数为  $0.390$ 。与原计算结果相比更合理地预测了盾构隧道接缝橡胶密封垫在设计服役期内频繁出现的渗漏水问题。因此, 一方面应当提高橡胶密封垫生产工艺, 控制表面的粗糙度及使用耐水解的添加剂, 减少密封垫表面老化对防水性能的影响; 另一方面, 由表2结果可知应在服役  $30 \text{ a}$  后加强对接缝处橡胶密封垫表面接触状况的监测与检修。

## 5 结 论

a. 随着老化时间的增加, 橡胶密封垫表面粗糙破损程度增大和橡胶材料的硬化促进了橡胶密封垫接触面间渗流通道的形成, 加快了接缝渗漏的发生, 橡胶密封垫的防水性能随着老化时间的增加而减小, 且下降

表1 长期防水性能折减系数

Table 1 Decrease coefficient values of long-term waterproof performance

T/K	$f_{pw}$					
	t=0 h	t=24 h	t=48 h	t=72 h	t=96 h	t=168 h
328	1	0.874	0.787	0.691	0.606	0.565
343	1	0.838	0.686	0.558	0.491	0.467
358	1	0.771	0.567	0.463	0.412	0.388

表2 橡胶密封垫长期防水性能折减系数

Table 2 Decrease coefficient values of long-term waterproof performance for rubber sealing pad

t/a	$f_{pw}$	t/a	$f_{pw}$
0	1	50	0.498
5	0.773	75	0.436
10	0.706	100	0.390
30	0.572		

速度逐渐降低。

**b.** 考虑橡胶密封垫接触面劣化和防水结构影响,在橡胶材料老化系数模型基础上推导了长期防水性能折减系数公式,可用于实际服役橡胶密封垫防水性能折减情况的预测。

**c.** 将本模型应用于广东榕江-关埠引水工程盾构隧洞的橡胶密封垫,最终计算得服役百年的老化折减系数为0.390,比仅考虑橡胶材料力学性能计算得到的结果偏小12.36%,与原计算相比更合理地预测了盾构隧道接缝橡胶密封垫在服役期内频繁出现的渗漏水问题。因此,应当提高橡胶密封垫生产工艺,控制表面的粗糙度及使用耐水解的添加剂,在隧道运营期内应加强对接缝处橡胶密封垫接触状况的监测和检修,保障盾构隧道的正常运行。

## 参考文献:

- [1] 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. (ZHU Zuxi. State-of-art and developing direction of waterproofing technology for sealing gasket of shield tunnel segment joints[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(10): 1171-1176. (in Chinese))
- [2] 叶治, 付岸然, 刘华北. 盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 279-287. (YE Zhi, FU Anran, LIU Huabei. Effect of seepage erosion of tunnel crown on ground settlement and structural deformation in shield tunnelling[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021, 49(3): 279-287. (in Chinese))
- [3] 肖明清, 谢宏明, 王士民, 等. 盾构隧道管片接缝防水体系演化历程与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1891-1902. (XIAO Mingqing, XIE Hongming, WANG Shimin, et al. Evolution and prospects of shield tunnel joints and segment waterproofing systems[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1891-1902. (in Chinese))
- [4] 刘璇, 杨睿. 橡胶密封材料老化研究进展[J]. 机械工程材料, 2020, 44(9): 1-10. (LIU Xuan, YANG Rui. Research progress on aging of rubber sealing materials[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(9): 1-10. (in Chinese))
- [5] 李咏今. 橡胶老化性能变化或寿命预测的计算方法[J]. 合成橡胶工业, 1989, 12(3): 205-209. (LI Yongjin. Properties change and calculation method of lifeprediction of aging rubber[J]. China Synthetic Rubber Industry, 1989, 12(3): 205-209. (in Chinese))
- [6] 钟小春, 秦建设, 朱伟, 等. 盾构管片接缝防水材料防水耐久性实验及分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(2): 281-285. (ZHONG Xiaochun, QIN Jianshe, ZHU Wei, et al. Durability tests and analysis on the waterproof material for joint seam of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(2): 281-285. (in Chinese))
- [7] 莫一婷, 杨林德, 伍振志, 等. 遇水膨胀橡胶的老化性能试验研究及寿命预测[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 235-238. (MO Yiting, YANG Linde, WU Zhenzhi, et al. Experimental research on aging performance and service life forecast of water swelling rubber[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2): 235-238. (in Chinese))
- [8] 沈佳佳. 地铁盾构隧道管片接头抗渗与耐久性能演化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [9] 张家奇, 顾质, 黄昕, 等. 盾构隧道防水密封垫长期服役性能预测的室内试验研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊2): 751-757. (ZHANG Jiaqi, GU Yun, HUANG Xin, et al. Experimental study on prediction of the long-term serviceability of waterproof gasket for shield tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(Sup2): 751-757. (in Chinese))
- [10] 张子新, 张家奇, 黄昕, 等. 盾构隧道密封垫长期防水性能预测的试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(1): 118-125. (ZHANG Zixin, ZHANG Jiaqi, HUANG Xin, et al. Experimental study on prediction of long-term durability of sealing gasket of shield tunnel[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2020, 54(1): 118-125. (in Chinese))
- [11] 董林伟, 江玉生, 杨志勇, 等. 隧道管片接缝密封垫防水机理及试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 469-474. (DONG Linwei, JIANG Yusheng, YANG Zhiyong, et al. Experimental study and water-resistant mechanism of gaskets in joints of tunnel segments[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 469-474. (in Chinese))
- [12] 张稳军, 王博达, 张高乐. 错台对盾构隧道接缝受力及防水性能的影响分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊1): 63-68. (ZHANG Wenjun, WANG Boda, ZHANG Gaole. The influence of dislocation on the stress and waterproof performance of shield tunnel joint[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup1): 63-68. (in Chinese))
- [13] 丁玉乔, 李成杰, 杨征, 等. 在模拟隧道地层环境介质中三元乙丙橡胶密封条老化行为和老化机理的研究[J]. 橡胶工业, 2019, 66(5): 323-331. (DING Yuqiao, LI Chengjie, YANG Zheng, et al. Study on aging behavior and mechanism of EPDM seals in simulated environment medium of tunnel strata[J]. China Rubber Industry, 2019, 66(5): 323-331. (in Chinese))
- [14] SHI Chenghua, CAO Chenyong, LEI Mingfeng, et al. Time-dependent performance and constitutive model of EPDM rubber gasket used for tunnel segment joints[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 490-498.

- [15] 孙昕,武威,焦亚基,等. 盾构隧道管片接缝气密性模拟方法与影响因素分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(2):375-382. (SUN Xin,WU Wei,JIAO Yaji, et al. Simulation method for gas tightness of segment joints of shield tunnels and analysis of influencing factors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(2):375-382. (in Chinese))
- [16] 张亚洲. 考虑密封垫表面工作状态的盾构隧道接缝防水能力数值模拟研究[J]. 隧道建设(中英文),2020,40(6):813-820. (ZHANG Yazhou. Numerical simulation on waterproof capacity of shield tunnel joints considering working state of sealing gasket surface[J]. Tunnel Construction,2020,40(6):813-820. (in Chinese))
- [17] 中国国家标准化管理委员会. 橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序:GB/T2941—2006[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2006.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定:GB/T528—2009[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2009.
- [19] PANDEY J K, REDDY K R, KUMAR A P, et al. An overview on the degradability of polymer nanocomposites[J]. Polymer Degradation and Stability,2005,88(2):234-250.
- [20] 中国国家标准化管理委员会. 高分子防水材料:GB18173.4—2010[S]. 北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2010.

(收稿日期:2022-04-25 编辑:刘晓艳)

(上接第 109 页)

- [9] 朱伟,赵笛,范惜辉,等. 渣土改良为流动化回填土的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(2):134-139. (ZHU Wei,ZHAO Di,FAN Xihui, et al. Research on application of residue soil-based flowable fill[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(2):134-139. (in Chinese))
- [10] 朱伟,张明晶,张志允. 土压平衡盾构气泡发泡剂的试验研究[C] //中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(下册). 北京:中国土木工程学会,2003:6.
- [11] 魏康林. 土压平衡盾构施工中泡沫和膨润土改良土体的微观机理分析[J]. 现代隧道技术,2007(1):73-77. (WEI Kanglin. Micromechanism analysis of foam and bentonite in improving earth mass in EPB shield tunneling[J]. Modern Tunnel Technology,2007(1):73-77. (in Chinese))
- [12] 秦建设,朱伟,林键. 盾构施工中气泡应用效果评价研究[J]. 地下空间,2004(3):350-353. (QIN Jianshe,ZHU Wei,LIN Jian. Evaluation of bubble application effect in shield construction[J]. Underground Space,2004(3):350-353. (in Chinese))
- [13] 林键,朱伟,钟小春. 气泡的稳定性对盾构施工中土体改良效果研究[J]. 岩土工程界,2005(12):38-41. (LIN Jian,ZHU Wei,ZHONG Xiaochun. Effect of bubble stability on soil improvement in shield construction[J]. Geotechnical Engineering,2005(12):38-41. (in Chinese))
- [14] 朱伟,陈仁俊. 盾构隧道技术问题和施工管理[J]. 岩土工程界,2001(12):14-16. (ZHU Wei,CHEN Renjun. Technical problems and construction management of shield tunnel[J]. Geotechnical Engineering,2001(12):14-16. (in Chinese))
- [15] 宋克志,汪波,孔恒,等. 无水砂卵石地层土压盾构施工泡沫技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(13):2327-2332. (SONG Kezhi,WANG Bo,KONG Heng, et al. Study on foam technology for earth pressure shield construction in anhydrous sandy pebble stratum[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(13):2327-2332. (in Chinese))
- [16] 隋冬冬. 无水砂层渣土改良技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2018.
- [17] 张润来,宫全美,周顺华,等. 砂卵石地层土压平衡盾构施工渣土改良试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(5):673-680. (ZHANG Runlai,GONG Quanmei,ZHOU Shunhua, et al. Soil conditioning tests for earth pressure balance shield applications in sandy pebble strata[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2019,47(5):673-680.
- [18] RAFFAELE V,CLAUDIO O I,DANIELE P. Soil conditioning of sand for EPB applications;a laboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2008,23(3):308-317.
- [19] 姜厚停,龚秋明,杜修力. 卵石地层土压平衡盾构施工土体改良试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(2):284-294. (JIANG Houting,GONG Qiumin,DU Xiuli. Experimental study on soil improvement of earth pressure balanced shield construction in pebble stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(2):284-294. (in Chinese))
- [20] 刘大鹏. 新型泡沫对土压平衡盾构土体改良作用评价[D]. 北京:中国地质大学,2012.

(收稿日期:2022-02-25 编辑:胡新宇)