

文章编号:1673-9469(2026)02-0065-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.02.008

盾构管片橡胶密封垫老化性能研究及服役寿命预测

胡指南,孟硕朋,毛洪涛

(石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障部共建教育部重点实验室,河北 石家庄 050043)

摘要: 为了研究密封垫在长期受压状态下接触应力的松弛规律,开展了密封垫在不同温度下的热氧老化试验。利用 ABAQUS 软件建立密封垫三维压缩数值模型,分析密封垫内部应力分布情况,并根据试验数据运用时温叠加原理预测密封垫的服役寿命。研究表明,密封垫的性能保持率随着老化时间的延长逐渐降低并趋于稳定,密封垫的性能保持率随老化温度的升高而减小;随着压缩量的增加,密封垫两端会翘起孔洞,且压缩量越大,翘起的孔洞越大,因此在满足防水要求的前提下,适当减小压缩量,有利于提升密封垫防水性能;密封槽-密封垫间的接触应力整体高于密封垫-密封垫间的接触应力,根据时温叠加原理计算可知,密封垫压缩 9 mm 可满足某地铁 1 号线 100 a 的防水要求。研究内容对于提高某地铁 1 号线的运营能力具有重要意义。

关键词: 橡胶密封垫;热氧老化;接触应力;数值模型;服役寿命

中图分类号:U451

文献标识码:A

Research on Aging Performance and Service Life Prediction of Rubber Sealing Gaskets for Shield Tunnel Segments

HU Zhinan, MENG Shuopeng, MAO Hongtao

(Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control of Ministry of Education,
Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: In order to study the relaxation law of the contact stress of sealing gaskets under long-term compression, the thermal-oxidative aging tests of the sealing gasket at different temperatures were carried out. ABAQUS software was used to establish a three-dimensional compression numerical model of the sealing gasket, so as to analyze the stress distribution inside the sealing gasket and predict the service life of the sealing gasket based on the test data and the time-temperature superposition principle. The research shows that the performance retention rate of the sealing gasket gradually decreases and tends to be stable with increasing aging time, while decreases with increasing aging temperature. With the increase of compression, holes tend to form at both ends of the sealing gasket due to warping, and the greater the compression, the larger the holes. Therefore, on the premise of meeting the waterproof requirements, the appropriate reduction of compression is conducive to improving the waterproof performance of the sealing gasket. The contact stress between the sealing groove and the sealing gasket is overall higher than that between the sealing gaskets. According to the calculations based on the time-temperature superposition principle, the compression of sealing gasket by 9 mm can meet the 100-year waterproof requirement of a certain subway Line 1. The present research is of great significance for improving the operational capacity of a certain subway Line 1.

Key words: rubber sealing gasket; thermal-oxidative aging; contact stress; numerical model; service life

收稿日期:2024-01-04 修回日期:2024-03-07

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(226Z5403G);国家自然科学基金资助项目(52578483)

第一作者:胡指南(1986—),男,辽宁铁岭人,博士,副教授,主要从事地下工程等方面的研究。

随着我国经济的持续发展,人们的生活水平越来越高,交通拥堵问题也日益突出^[1]。为解决这一问题,越来越多的城市开始修建地下盾构隧道。地下盾构隧道作为重要工程结构物,其正常服役不仅对于缓解城市交通拥堵、保障市民出行畅通有重要作用,同时对提升地下空间服务品质、增强人防工程防护韧性也有重要意义。盾构管片接头防水主要依赖橡胶密封垫间的接触应力(两物体相互接触时,在表面上产生的局部压入应力)来实现。然而,在热氧环境作用下,随着密封垫服役年限的增加,密封垫的力学性能会逐渐劣化,缩短盾构隧道的服役寿命。因此,开展密封垫力学性能随服役年限的劣化程度研究及服役寿命的预测尤为重要^[2-3]。

目前,盾构管片主要采用三元乙丙橡胶(EPDM)密封垫进行防水,经过多年的研究,相关领域已经取得了一系列成果。杨晓红等^[4-5]通过热氧老化试验研究了密封垫的硬度、拉伸强度等物理力学性能随老化时间的变化规律;Shi等^[6]对EPDM进行地下水热加速老化试验,得出拉伸强度及伸长率的退化规律;文彦鑫等^[7-8]通过密封垫防水性能试验研究了张开量、错台量等因素对密封垫防水性能的影响;丁扬等^[9-10]通过ABAQUS软件分析了密封垫的失效模式,研究了密封垫断面形式及布置形式对其防水性能的影响;马妍等^[11-14]基于Arrhenius原理,以拉断伸长率、氧化诱导期等为寿命评价指标预测密封垫的使用寿命。

本文依托某地铁1号线盾构隧道,选用工程实际应用的橡胶密封垫作为研究对象,开展了橡胶密封垫在不同温度下的热氧老化试验,深入分析其接触应力的松弛规律;运用ABAQUS软件构建密封垫三维压缩数值模型,分析密封垫内部应力变化及分布情况;采用时温叠加原理建立密封垫的自然老化方程,并预测密封垫的服役寿命。本研究内容对于提高某地铁1号线的服役能力具有重要意义。

1 密封垫力学性能试验

1.1 试验材料

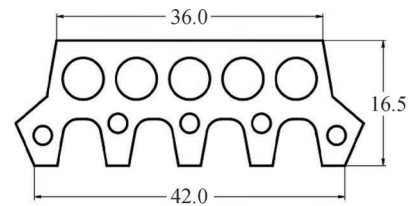
某地铁1号线隧道顶部覆土厚度约为15.39 m,隧道外径为6.2 m,内径为5.5 m,盾构管片接缝的设计水压为0.209 MPa,设计文件中要求密封垫在压缩量为5~12 mm时仍满足防水要求。试验所用盾构管片EPDM密封垫为某地铁1号线实际应用的

橡胶材料,试验材料的基本性能指标如表1所示。

表1 试验所用EPDM密封垫基本性能指标
Tab. 1 Basic performance indicators of the EPDM sealing gaskets used in the test

试验条件	项目	指标
常温	硬度(绍尔A)/度	72±5
常温	拉伸强度/MPa	≥16
常温	拉断伸长率/%	≥400
热空气老化 70℃×168 h	硬度(绍尔A)/度	≤+6
热空气老化 70℃×168 h	拉伸强度/MPa	≥13
热空气老化 70℃×168 h	拉断伸长率/%	≥320

密封垫截面尺寸为顶面宽36 mm、底面宽42 mm、高16.5 mm;密封垫中间部分开孔,孔的直径分别为5.5 mm及2.5 mm;底部呈锯齿状。试样长度为100 mm,具体截面尺寸及形状如图1所示。



(a) 密封垫试样尺寸图(单位: mm)



(b) 密封垫试样形状图

图1 密封垫试样尺寸及形状图

Fig. 1 Size and shape diagrams of sealing gasket samples

1.2 试验工装及仪器

1.2.1 试验工装

密封垫在实际使用时呈上下对称布置,分别嵌入盾构管片凹槽内的对应位置,通过盾构管片对其挤压产生接触力来达到防水效果^[15]。

为模拟密封垫服役过程中受到的挤压作用,设计了如图2所示的压缩工装。该压缩工装由上盖板、下盖板、螺栓杆、螺母、平垫、弹垫及限位器组成。通过螺栓杆和螺母紧固上下盖板,以模拟盾构管片对密封垫的压缩作用;上下盖板设有凹槽,用于模拟管片密封槽对防水密封垫的限制作用;接缝位移大小通过套在螺栓杆上的限位器来控制,限位器的高度即为接缝高度。

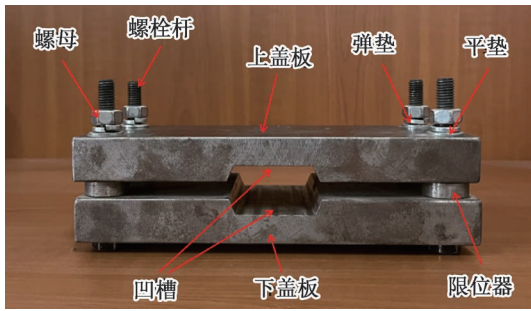


图 2 压缩工装

Fig. 2 Compression fixture

1. 2. 2 试验所用仪器

(1) WDW-50 微机控制电子万能材料试验机。该仪器采用微机控制加载方式,并配备自动采集测试数据系统,用于采集试件在不同接缝位移条件下的压缩量-压缩反力数据曲线。

(2) 电热鼓风烘箱。本文选用苏州市吴江区威信电热设备有限公司生产的 WX-881-3 型电热鼓风烘箱,其温度使用范围为 25~300 °C,控温精度为±2 °C,用于模拟密封垫热氧老化环境,如图 3 所示。



(a) 电子万能材料试验机



(b) 电热吹风烘箱

图 3 试验所用仪器

Fig. 3 Instruments used in the test

1. 3 试验方案

1. 3. 1 单轴拉伸试验

试验使用哑铃型裁刀,将密封垫按《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》(GB/T 528—2009)规定裁成“ I ”型哑铃状拉伸试样。按照试验标准规定,每组单轴拉伸试样不少于 3 个,分别标号为 T25-1~3,如图 4 所示。按规范(GB/T 528—2009)中规定的拉伸速率(500 mm/min)、采样频率(1 Hz)对试样开展加载拉伸试验。

1. 3. 2 常温压缩试验

准备 6 个长度为 100 mm 的试件,2 个密封垫为一组,共 3 组试样,分别标号为 C25-1~3。



图 4 哑铃状拉伸试样

Fig. 4 Dumbbell-shaped tensile samples

将密封垫放置于压缩工装内,以 50 mm/min 的速率压缩试样,当压缩工装上、下盖板位移为 0 mm 时,试验结束,如图 5 所示。

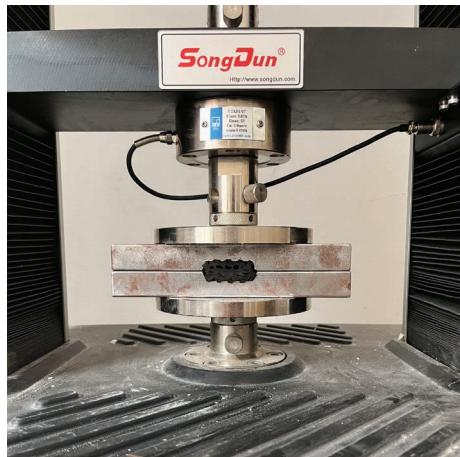


图 5 密封垫完全压缩状态

Fig. 5 Sealing gasket in fully compressed state

1. 3. 3 热氧老化试验

盾构管片接缝密封垫采用的热氧老化方法主要是烘箱加速老化。这是因为烘箱加速老化与自然老化条件最接近,其试验条件可控,能够有效缩短试验周期^[16]。试验按照《橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序》(GB/T 2914—2006)中推荐的试验温度、测试频率开展测试。

热氧老化试验共设置 3 个老化温度,分别为 70、85、100 °C。根据此盾构隧道设计文件要求,密封垫在压缩 5~12 mm 时仍能满足防水要求,因此热氧老化试验设置压缩量为 9 mm,压缩速率同样设置为 50 mm/min,以此获取不同老化温度下密封垫的接触应力变化规律。

2 试验结果及分析

2. 1 单轴拉伸试验结果及分析

通过对密封垫开展单轴拉伸试验,可以得到

密封垫的名义应力-名义应变曲线,试验结果如图6所示。

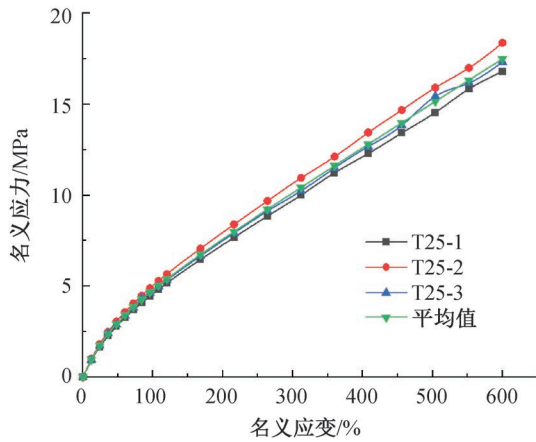


图6 密封垫名义应力-名义应变曲线

Fig. 6 Nominal stress-strain curves of sealing gasket

由图6可知,密封垫的名义应力-名义应变曲线呈单调递增趋势;在拉伸过程中,试样初始刚度较大,当名义应变达到20%后,试样刚度开始降低,并在后续的拉伸过程中基本保持不变。

2.2 常温压缩试验结果及分析

通过密封垫的常温压缩试验,可得到密封垫老化前的压缩曲线,试验结果图7所示。

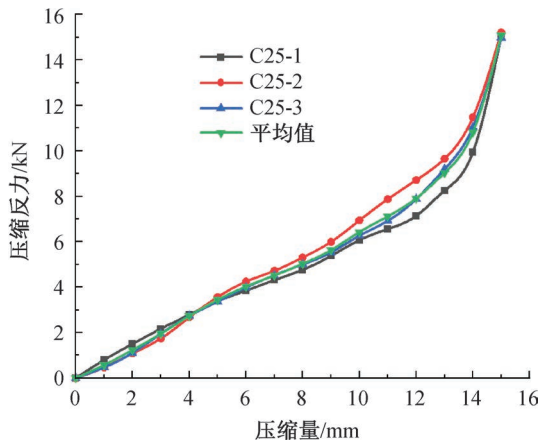


图7 密封垫老化前压缩曲线

Fig. 7 Curves of compression of sealing gasket before aging

由图7可知,密封垫的压缩反力随着压缩量的增加而增大。当压缩量小于6 mm时,压缩反力与压缩量呈线性关系;当压缩量达到11 mm后,压缩反力随压缩量的增大呈迅速增长趋势,呈现出明显的应变硬化规律。试样上表面尺寸为36 mm×100 mm,根据密封垫间的压缩反力数据可计算得出,当密封垫压缩量为9 mm时对应的密封垫间平均接触应力为1.565 MPa。

2.3 热氧老化试验结果及分析

定义 P 为密封垫的性能保持率,即密封垫老化后接触应力 σ 与老化前接触应力 σ_0 的比值。图8展示了密封垫 P 值在不同老化温度下的变化规律。由此可得,在老化初期,密封垫性能保持率下降较快;随着老化时间的延长,下降速率逐渐变缓并趋于稳定。同时,密封垫的性能保持率随老化温度的升高而降低。

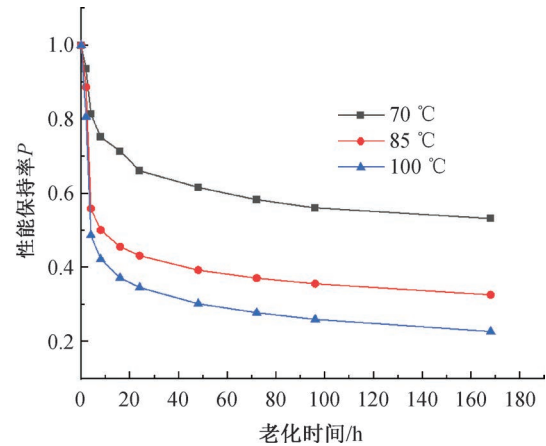


图8 密封垫性能保持率变化规律

Fig. 8 Variation laws of performance retention rate of sealing gasket

3 密封垫有限元仿真

3.1 有限元模型建立

通过有限元软件ABAQUS建立压缩工装及密封垫试样的三维数值足尺模型。由于密封垫上、下钢板弹性模量相对较大,在计算时将其简化为刚体进行计算,密封槽及密封垫采用ABAQUS中的3D Stress单元C3D8R,模型整体采用六面体单元划分网格,如图9所示。

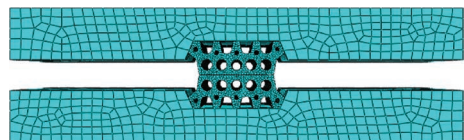


图9 密封垫三维数值模型

Fig. 9 Three-dimensional numerical model of sealing gasket

在实际服役过程中,密封垫底部与密封槽底部采用单组氯丁-酚醛胶粘结,因此,密封垫底部与密封槽底部接触设置为Tie接触;密封垫侧边与密封槽侧边、密封垫顶部与密封垫顶部接触设置均为表面-表面摩擦接触;在密封垫压缩过程中,密封垫孔洞会产生接触,因此,密封垫孔洞接触设置为自接触。

根据实际情况,下方的密封槽采用固定约束,上方的密封槽施加竖向位移边界条件,如图 10 所示。

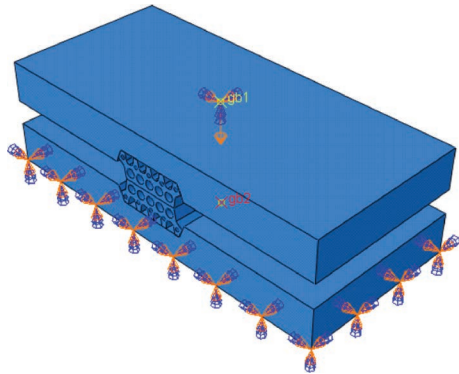


图 10 边界条件设置

Fig. 10 Boundary condition settings

3.2 超弹本构选取及参数确定

在建立数值模型时,为与模型试验保持一致,上、下盖板同样采用 Q235 材质的钢板,并设置钢板材料属性如下:密度为 $7.8 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$,弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 0.3;EPDM 密封垫的密度为 $1.412 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ 。

橡胶材料为超弹材料,在 EPDM 密封垫力学性能的相关数值计算中,通常采用基于连续介质唯象理论的本构模型。将单轴拉伸试验得到的密封垫的名义应力-名义应变数据代入 ABAQUS 软件中,材料行为设置为超弹性,材料类型为各向同性,选择单轴试验数据,输入名义应力、名义应变数据,经评估后得到各个本构模型参数,如表 2 所示。

表 2 不同本构模型参数表

Tab. 2 Parameter table for different constitutive models

本构模型	参数
Mooney-Rivlin/MPa	$C_{10} = 1.206, C_{01} = 0.322$
Ogden	$\mu_1 = 2.402 \text{ MPa}, \mu_2 = 0.00014 \text{ MPa},$ $\mu_3 = 0.658 \text{ MPa},$ $\alpha_1 = 2.002, \alpha_2 = 3.999, \alpha_3 = -1.999$
Yeoh/MPa	$C_{10} = 1.411, C_{20} = -0.0054, C_{30} = 0.000058$
Neo-Hookean/MPa	$C_{10} = 1.337$

为验证上述本构模型参数的准确性及各本构模型的适用性,本文建立密封垫三维压缩数值模型,并分别采用上述本构模型及其参数进行分析。

将表 2 中的各本构模型及其参数代入密封垫三维压缩模型中进行计算,得到压缩量-压缩反力曲线,与试验数据进行对比,如图 11 所示。由图可知,各本构模型计算得到的压缩量-压缩反力曲线

的趋势与试验所得曲线趋势基本一致;与 Ogden 超弹本构模型、Neo-Hookean 超弹本构模型及 Yeoh 超弹本构模型等相比,Mooney-Rivlin 超弹本构模型计算结果误差最小,仅为 6.5%。综上可得,采用 Mooney-Rivlin 超弹本构模型计算更加准确。

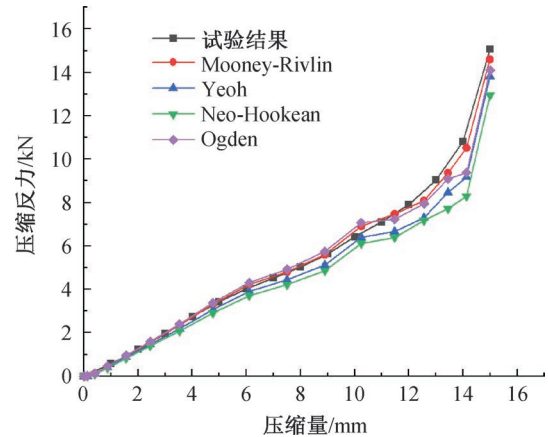


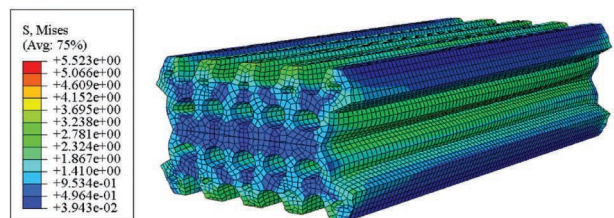
图 11 不同超弹本构模型对比

Fig. 11 Comparison of different hyperelastic constitutive models

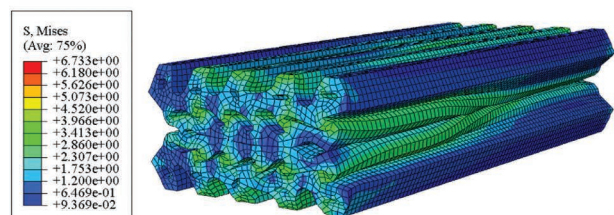
3.3 计算结果分析

将上述参数代入有限元模型中,可得到密封垫在分别压缩 6、9、12 mm 这 3 种工况下的计算结果。

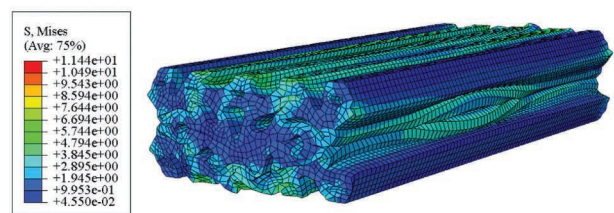
3 种工况的 Mises 应力云图,如图 12 所示。由此可知,密封垫在压缩过程中 Mises 应力在竖直



(a) 压缩量为 6 mm



(b) 压缩量为 9 mm



(c) 压缩量为 12 mm

图 12 密封垫 Mises 应力云图

Fig. 12 Mises stress cloud maps of sealing gasket

方向上呈现“层状分布”的特性,在水平方向上呈现“对称分布”的特性,且这种特性随着压缩量的增大而减弱;随着压缩量的增加,密封垫两端会翘起孔洞,且压缩量越大,翘起的孔洞越大,因此在满足防水要求的前提下,适当减小压缩量,有利于提升密封垫防水性能。

在利用密封垫进行盾构管片接头防水的过程中,存在两条可能的渗漏水通道,分别为密封垫-密封垫接触面及密封槽-密封垫接触面。由于两条通道接触面的面积大小不一致,为了比较两条通道防水能力的关系,可以采用平均接触应力来表征,即对密封垫接触面的接触应力曲线进行积分,积分结果除以接触面长度^[17-18]。

密封垫的接触应力可直接从 ABAQUS 软件中提取,根据提取结果计算得到不同压缩量下两条渗漏水通道平均接触应力,如图 13 所示。由图可知,随着压缩量的增大,密封槽-密封垫间的接触应力与密封垫-密封垫间的接触应力均呈现上升趋势;密封槽-密封垫间的接触应力整体高于密封垫-密封垫间的接触应力,因此密封垫渗漏水主要发生在密封垫-密封垫接触面上;当压缩量不小于 2 mm 时,密封槽-密封垫间的接触应力以及密封垫-密封垫间的初始接触应力均大于设计水压(0.209 MPa)。

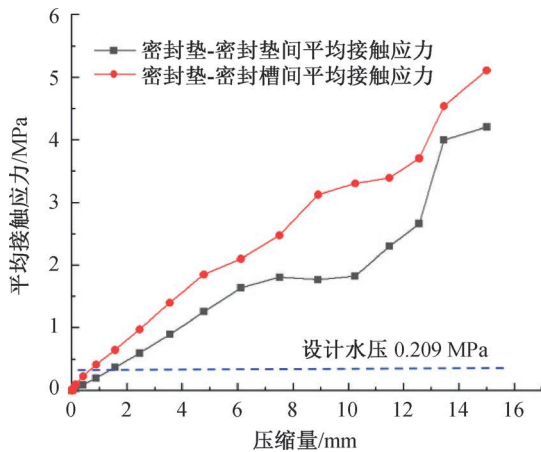


图 13 不同压缩量下密封垫接触应力分析

Fig. 13 Analysis of contact stress of sealing gasket under different compression amounts

4 密封垫服役寿命预测

4.1 时温叠加原理

时温叠加法是一种作图方法,基本原理是利用高温加快化学反应速率,达到在短时间内获取材料性能老化规律的目的^[19]。

在热氧老化的作用下,EPDM 密封垫性能老化速率满足 Arrhenius 方程,如式(1)所示:

$$k = A \exp(-E_a/RT) \quad (1)$$

式中: k 为反应速率; A 为常数; E_a 为化学反应的表观活化能; T 为绝对温度; R 为理想气体常数。

假设 T_0 为参考温度,参考温度下的反应速率为 k_0 ;假设 T 为任意试验温度,此试验温度下的反应速率为 k ,定义 k/k_0 为任意试验温度下的平移因子 α_T ,则:

$$\alpha_T = \exp(E_a/RT - E_a/RT_0) \quad (2)$$

将式(2)两边同时取以 10 为底的对数,可得到:

$$\lg \alpha_T = b(1/T - 1/T_0) \quad (3)$$

式中: $b = (E_a \times \lg e)/R$, b 为常数。

由式(3)可知,不同温度下的平移因子的对数与温度的倒数呈线性关系。

采用时温叠加法预测 EPDM 密封垫常温下的服役寿命。首先,根据试验数据外推得到各试验温度下的临界老化时间,定义较低试验温度为参考温度,其平移因子为 1,再根据各试验温度下的临界老化时间求得其他试验温度下的平移因子;由于平移因子的对数与温度的倒数呈线性关系,因此可以得到常温下的平移因子;最后,利用各试验温度及常温下的平移因子,将高温下的试验数据平移至常温,拟合得到常温下密封垫性能保持率随时间的变化规律,从而预测密封垫常温下的服役寿命。

4.2 密封垫寿命预测方程

根据 EPDM 密封垫热氧老化的接触应力松弛数据,利用时温叠加法可预测密封垫在自然老化条件(23 °C)下的使用寿命。

由某地铁 1 号线的设计文件可知,其设计水压为 0.209 MPa;由试验测定,当密封垫压缩量为 9 mm 时,初始接触应力为 1.565 MPa。因此,在该工况下 $P_{\text{临}} = 0.209/1.565 = 0.134$ 。根据热氧老化试验数据,利用 Origin 软件进行非线性拟合,可得各温度下性能保持率 P 与老化时间 t 的曲线及关系式。其中,各曲线的相关系数 R 均大于 0.99,将 $P_{\text{临}} = 0.134$ 代入 P 与 t 的关系式中,能够计算出各温度下的失效时间,如表 3 所示。

设定较低试验温度(70 °C)下的平移因子为 1,根据时温叠加法原理,可计算得到 85 °C 及 100 °C 下的平移因子,如表 4 所示。

由时温叠加原理推导可知,不同温度下的平移因子的对数与温度的倒数呈线性关系。根据表 4 数

表 3 各温度下的失效时间

Tab. 3 Failure time at different temperatures

老化温度/℃	P 与 t 的关系式	失效时间/h
70	$P=0.88272-0.06947\ln(t-1.5301)$	$t_{70}=47936$
85	$P=0.59456-0.05278\ln(t-1.99601)$	$t_{85}=6163$
100	$P=0.52778-0.05888\ln(t-1.99128)$	$t_{100}=804$

表 4 各温度下的平移因子

Tab. 4 Translation factors at different temperatures

温度/℃	热力学温度/K	$1/T$	平移因子 α	$\lg\alpha$
70	343.15	0.00291	1.000	0.000
85	358.15	0.00279	0.173	-0.762
100	373.15	0.00268	0.027	-1.666

据,利用 Origin 软件进行线性拟合可得到温度与平移因子的关系式,其关系式的相关系数 R 大于 0.99,如图 14 所示。将地下温度 $T=23\text{ }^\circ\text{C}$ (296.15 K) 代入关系式可得 $\lg\alpha_{23}=3.610$,进一步求得 $\alpha_{23}=4\ 072.865$ 。

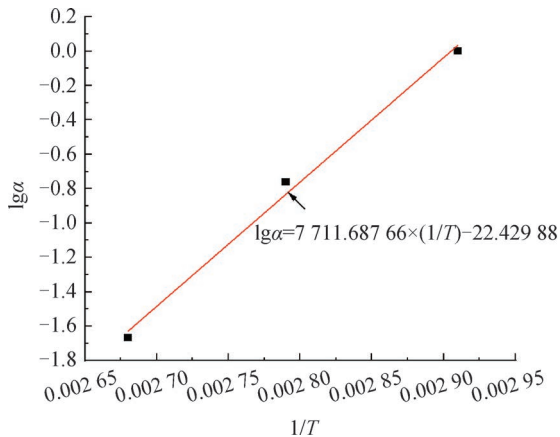


图 14 不同温度下平移因子拟合直线及关系式

Fig. 14 Fitting straight line and relational expression of translation factors at different temperatures

将 85、100 $^\circ\text{C}$ 温度下的热氧老化数据平移至 70 $^\circ\text{C}$ 下,然后利用平移因子 α_{23} 将 70 $^\circ\text{C}$ 的数据平移至自然老化温度 (23 $^\circ\text{C}$),可得到自然老化温度下密封垫的性能保持率 P 与老化时间 t 的数据,利用 Origin 软件对平移后的数据进行非线性拟合,可得到自然老化温度下 P 与 t 的关系式,进一步预测自然老化温度下 100 a 后的密封垫的性能保持率,如图 15 所示。

由图 15 可得,压缩 9 mm 工况下密封垫自然老化方程,见式(4)

$$P = -1.0879\ln(0.046883\ln t) \quad (4)$$

将 $t=100\text{ a}=876\ 000\text{ h}$ 代入上述方程可得密封垫的性能保持率为 0.483,进一步计算可得 100 a 后

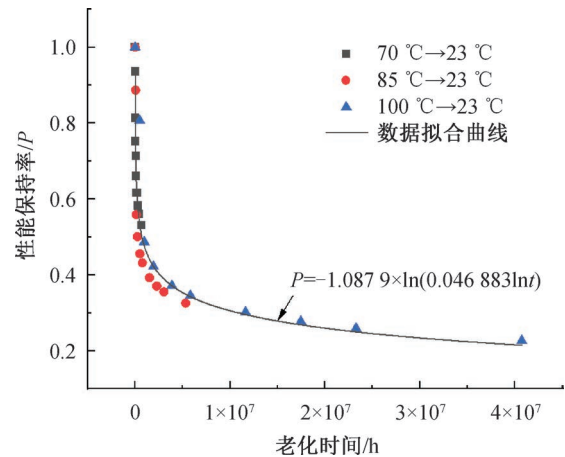


图 15 密封垫自然老化曲线

Fig. 15 Natural aging curve of sealing gasket

密封垫的接触应力为 $0.483 \times 1.565 = 0.756\text{ MPa}$ $>$ 0.209 MPa ,满足防水要求。

根据时温叠加原理计算,当密封垫压缩量为 9 mm 时,使用 100 a 后的残余接触应力仍大于某地铁 1 号线的设计水压。这表明,在仅考虑热氧环境影响的情况下,该密封垫能够满足 100 a 的防水要求。

5 结论

根据热氧老化试验研究了密封垫的接触应力在不同老化温度下的变化规律,利用数值软件分析了密封垫内部应力的变化及分布情况,采用时温叠加原理预测了密封垫的服役寿命。通过以上研究可得到以下结论:

1) 密封垫老化初期的性能保持率下降较快,随着老化时间的延长,下降速率逐渐变缓并趋于稳定;密封垫的性能保持率随老化温度的升高而降低。

2) 密封垫在压缩过程中 Mises 应力在竖直方向上呈现“层状分布”的特性,在水平方向上呈现“对称分布”的特性,且这种特性随着压缩量的增大而减弱;随着压缩量的增加,密封垫两端会翘起孔洞,且压缩量越大,翘起的孔洞越大。因此,在满足防水要求的前提下,适当减小压缩量,有利于提升密封垫的防水能力。

3) 密封槽-密封垫间的接触应力整体高于密封垫-密封垫间的接触应力,因此密封垫渗漏水主要发生在密封垫-密封垫接触面上;根据时温叠加原理计算,密封垫在压缩 9 mm 的情况下,使用 100 a 后的性能保持率可达到 0.483,且残余接触应力仍大于设计水压,因此满足此地铁的工程使用要求。

参考文献:

- [1] 刘琼,吴雄志,姚捷,等.盾构隧道管片衬砌内力计算方法对比分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2008,25(3):26-29.
LIU Q, WU X Z, YAO J, et al. Comparison and analysis of methods of internal force calculations for shield tunnel lining[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2008, 25(3): 26-29.
- [2] 毕鑫磊,张硕,彭方灵,等.盾构管片拼接缝渗漏水问题分析与思考[J].中国建筑防水,2022(9):37-40.
BI X L, ZHANG S, PENG F L, et al. Analysis and consideration on the leakage of shield segment joint[J]. China Building Waterproofing, 2022(9): 37-40.
- [3] 国钦瑞,邵华锋.橡胶的老化机理及老化行为的研究进展[J].高分子通报,2022,35(2):17-24.
GUO Q R, SHAO H F. Progress in aging mechanism and behavior of rubbers[J]. Polymer Bulletin, 2022, 35(2): 17-24.
- [4] 杨晓红,许进升,周长省,等.三元乙丙橡胶热氧老化后的力学性能[J].北京理工大学学报,2017,37(2):126-130.
YANG X H, XU J S, ZHOU C S, et al. Microcosmic structure and mechanics performance of EPDM rubber in hot-oxygen aging[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(2): 126-130.
- [5] 杨大勇,张小飞,章定文,等.隧道接缝橡胶止水带老化性能试验研究与分析[J].地基处理,2022,4(S1):51-57.
YANG D Y, ZHANG X F, ZHANG D W, et al. Experimental research and analysis on aging performance of rubber waterstop for tunnel joints[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(S1): 51-57.
- [6] SHI C H, CAO C Y, LEI M F, 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.
- [7] 文彦鑫,霍永鹏,吴悦,等.高水压盾构隧道管片密封垫装配力与防水性能研究[J].现代隧道技术,2022,59(4):273-283.
WEN Y X, HUO Y P, WU Y, et al. Assembly force and waterproofing performance of segment sealing gasket in high water pressure shield tunnels[J]. Modern Tunneling Technology, 2022, 59(4): 273-283.
- [8] 吴炜枫,丁文其,魏立新,等.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.
WU W F, DING W Q, WEI L X, et al. Experimental study on joint waterproofing gasket patterns for deep se-
- wage tunnels excavated by shield machines[J]. Modern Tunneling Technology, 2016, 53(6): 190-195.
- [9] 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.
DING Y, MENG W, DENG W W. Study on durability and section design of sealing rubber pad of shield segment[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(4): 45-49.
- [10] 张建刚,孟庆明,李围,等.防水密封垫布置方式对管片接头的力学影响分析[J].隧道建设(中英文),2019,39(11):1790-1796.
ZHANG J G, MENG Q M, LI W, et al. Mechanical analysis of segment joints with different arrangement of waterproof sealing gaskets[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(11): 1790-1796.
- [11] 马妍,冯德和,王峰,等.三元乙丙橡胶热氧老化性能研究及寿命预测[J].特种橡胶制品,2022,43(1):1-4.
MA Y, FENG D H, WANG F, et al. Study on thermal oxygen aging properties and life prediction of EPDM[J]. Special Purpose Rubber Products, 2022, 43(1): 1-4.
- [12] 王安迎,王林林,王伟.三元乙丙橡胶热氧老化试验与密封条寿命预测[J].弹性体,2021,31(1):5-9.
WANG A Y, WANG L L, WANG W. Thermal oxygen ageing test of EPDM and life prediction of rubber sealing strip[J]. China Elastomerics, 2021, 31(1): 5-9.
- [13] 张力伟,孙秀茹,熊英,等.以氧化诱导期为性能变化指标推算三元乙丙橡胶O型密封圈的贮存寿命[J].高分子材料科学与工程,2021,37(10):105-111.
ZHANG L W, SUN X R, XIONG Y, et al. Lifetime estimation of EPDM O-rings by using oxidation induction time as performance indicator[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(10): 105-111.
- [14] 赵江山,武立伟,张会峰,等.废旧橡胶铁尾矿砂砂浆力学性能[J].华北理工大学学报(自然科学版),2021,43(1):79-85.
ZHAO J S, WU L W, ZHANG H F, et al. Mechanical properties of iron ore tailings mortar with waste rubber[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 43(1): 79-85.
- [15] 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 L W, JIANG Y S, YANG Z Y, 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.

- [16] 陈晨,黄冬梅,章向宇,等.不同天然胶乳含量乳胶海绵材料的热空气老化行为[J].合成橡胶工业,2021,44(6):495-500.
CHEN C, HUANG D M, ZHANG X Y, et al. Hot air aging behavior of rubber latex foams materials with different natural rubber latex content[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2021, 44(6):495-500.
- [17] 张稳军,丁超,张成平,等.不同错台量对复合型密封垫影响及长期防水预测[J].隧道建设(中英文),2020,40(3):337-345.
ZHANG W J, DING C, ZHANG C P, et al. Influence of different dislocation amount on composite sealing gasket and long-term waterproofing performance prediction [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(3):337-345.
- [18] 郑洪龙,魏然然,聂中华,等.管道离心式压缩机叶轮
的流固耦合数值模拟及可靠性评估[J].油气与新能源,2024,36(5):57-67+74.
ZHENG H L, WEI R R, NIE Z H, et al. Fluid-solid coupling numerical simulation and reliability study of pipeline centrifugal compressor impeller [J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(5):57-67+74.
- [19] 刘巧斌,史文库,陈志勇,等.基于插值和时温叠加原理的橡胶老化寿命预测方法[J].工程科学与技术,2019,51(4):217-221.
LIU Q B, SHI W K, CHEN Z Y, et al. Rubber aging life prediction method based on time-temperature superposition principle and interpolation [J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(4):217-221.
- (责任编辑 周雪梅)
-
- (上接第35页)
- [20] 芮圣洁,陈晓岚,刘清华,等.基于含水率及干湿循环膨胀土强度研究[J].科学技术与工程,2017,17(25):284-289.
RUI S J, CHEN X L, LIU Q H, et al. Study on the strength of expansive soil based on water content and dry wet cycle [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(25):284-289.
- [21] 王军,宗全利,岳红艳,等.干湿交替对长江荆江段典型断面岸滩土体力学性能的影响[J].农业工程学报,2019,35(2):144-152.
WANG J, ZONG Q L, YUE H Y, et al. Influence of dry-wet alternation condition on mechanical properties of riverbank soil for typical sections in Jingjiang Reach of Yangtze River [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2):144-152.
- [22] 常五岳.易崩解红砂岩在不同含水率下的剪切性质分析[D].兰州:兰州大学,2022.
CHANG W Y. Analysis of shear properties of collapsible red sandstone under different water content [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022.
- [23] 李映波,张存良,黎洪江,等.基于初始含水率的非饱和土抗剪强度模型[J].中国水运,2022,22(3):29-31.
LI Y B, ZHANG C L, LI H J, et al. Shear strength model of unsaturated soil based on initial moisture content [J]. China Water Transport, 2022, 22(3):29-31.
- [24] 刘子豪,张建成,张波,等.含水率对土钉锚固土体抗剪性能影响[J].山东大学学报(工学版),2023,53(3):14-22.
LIU Z H, ZHANG J C, ZHANG B, et al. Influence of moisture content on shear performance of soil nailed anchored soil [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2023, 53(3):14-22.
- [25] 孙冠华,郑宏,李春光.基于等效塑性应变的边坡滑面搜索[J].岩土力学,2008,29(5):1159-1163.
SUN G H, ZHENG H, LI C G. Searching critical slip surface of slopes based on equivalent plastic strain [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5):1159-1163.
- (责任编辑 周雪梅)