

隧道接缝橡胶止水带老化性能试验研究与分析

杨大勇¹, 张小飞², 章定文^{1*}, 高雷², 孙晋²

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 昆山交通发展控股集团有限公司, 江苏 昆山 215300)

摘要: 橡胶止水带的长期性能对隧道的安全运行有着重要的意义, 本文通过热空气老化试验研究橡胶止水带的老化性能及其变化规律。老化实验表明, 橡胶硬度随着老化时间的增加而逐渐增大, 且温度越高, 增大的幅度越大; 橡胶拉断伸长率、拉伸强度均随老化时间的增加而减小, 且温度越高, 减小的幅度越大; 利用试验结果计算橡胶 Mooney-Rivlin 模型中的参数 C_{10} 和 C_{01} , 结果表明 C_{10} 与橡胶硬度、 C_{01} 和拉断伸长率之间的相关系数分别为 0.947 和 0.864, 具有较高的相关性; 在此基础上以橡胶拉断伸长率为老化特征建立了橡胶止水带长期性能预测模型, 结果表明百年后橡胶止水带的变形性能仅为初始的 40%。

关键词: 橡胶止水带; 老化; Mooney-Rivlin 模型; 性能预测; 老化系数

中图分类号: TU94

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)S-0051-07

Experimental research and analysis on aging performance of rubber waterstop for tunnel joints

YANG Da-yong¹, ZHANG Xiao-fei², ZHANG Ding-wen^{1*}, GAO Lei², SUN Jin²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Kunshan Transportation Development Holding Group Co., Ltd., Kunshan 215300, Jiangsu, China)

Abstract: The long-term performance of rubber waterstop is of great significance to the safe operation of tunnel. This paper studies the aging performance and change law of rubber waterstop through hot air aging tests. The aging experiment shows that the rubber hardness increased gradually with the increase of aging time, and the higher the temperature, the greater the increase range. The elongation at break and tensile strength of rubber decreased with the increase of aging time, and the higher the temperature, the greater the decrease. The test results were used to calculate the parameters C_{10} and C_{01} in rubber Mooney-Rivlin model. The results show that the correlation coefficients between C_{10} and rubber hardness, C_{01} and elongation at break are 0.947 and 0.864 respectively, which displayed a high correlation. The long-term performance prediction model of rubber waterstop was established based on the aging characteristics of rubber elongation at break. The deformation performance of rubber waterstop is predicted to be only 40% of the initial one after 100 years.

Key words: rubber waterstop; aging; Mooney-Rivlin model; performance prediction; aging coefficient

0 引言

随着我国城镇化水平的提高, 交通拥堵问题日益突出, 越来越多的城市开始修建地下道路隧道来解决这一问题。城市道路隧道借鉴了公路、铁路隧道的防水设计经验, 但渗漏水问题依然广泛存在。据统计约有 2/3 的城市道路隧道出现程度不一的渗漏水状况^[1], 而超过 30% 的渗漏出现在隧道的接缝

位置^[2], 因此接缝处的防水至关重要。

城市道路隧道多采用明挖现浇的施工方法, 其接缝处的防水措施包括: 中埋式止水带、内贴式和外贴式止水带、嵌缝填充材料^[3], 如图 1 所示。中埋式止水带通过延长渗流路径和阀门原理^[4], 在接缝处的防水体系中起决定性的作用, 图 2 为工程中常用的中埋式钢边止水带^[5]。在材质上, 硫化橡胶材料因其良好的密封性、延展性成为了生产止水带

收稿日期: 2022-03-14

作者简介: 杨大勇 (1997—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事隧道与地下工程方面的研究。E-mail: 15252202305@163.com。

*通信作者: 章定文 (1978—), 男, 湖南常德人, 教授, 博士生导师, 主要从事特殊地基处理和环境岩土工程等方面的教学与研究工作。
E-mail: zhang@seu.edu.cn。

的主要材料,但随着地下工程服役时间的增长,防水材料的老化问题逐渐暴露^[6],如何提高防水材料长期防水性能是目前亟待解决的问题。

本文以工程中实际使用的橡胶止水带原材料作为研究对象,通过热空气老化试验获得材料性能的变化规律,在此基础上建立橡胶止水带长期性能的预测模型,对橡胶止水带的长期工作性能进行预测和评价。

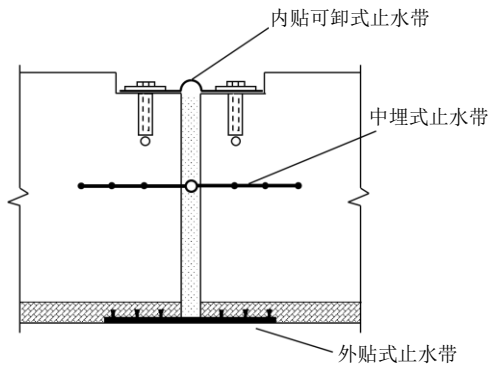


图1 城市道路隧道接缝处防水措施图

Fig. 1 Waterproofing measures at joints of urban road tunnels



图2 中埋式钢边止水带

Fig. 2 Middle buried steel edge waterstop

1 橡胶止水带热空气老化试验

1.1 试验方案

热空气加速老化试验是研究橡胶老化性能最主要的方法,前人的研究表明,在一定的高温范围内,橡胶的老化过程与在自然环境下的老化过程基本一致^[7]。

根据我国《橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序》(GB 2941—2006)推荐的方法进行试验。试验方案设计如表1所示。

表1 试验方案设计表

Table 1 Test scheme

试验温度	测试时间点	测试项目
55 °C (328 K)		
70 °C (343 K)	8 h、16 h、24 h	邵氏 A 硬度
85 °C (358 K)	48 h、72 h、96 h	拉伸强度
100 °C (373 K)	168 h	拉断伸长率

试验使用的橡胶止水带材料由苏州鑫瑞禹橡塑材料有限公司提供,其主要成分为硫化橡胶,基本性能指标如表2所示;热空气老化试验采用东南大学交通学院实验中心的热空气老化烘箱,其温度控制范围为50 °C~250 °C,精度为0.1 °C;硬度使用LX-A型邵氏橡胶硬度计进行测试;拉伸性能试验使用UTM-6503型5 000 N电子万能试验机,位移控制速率范围为0.001~500 mm/min。

表2 试验用橡胶止水带基本性能指标

Table 2 Basic index of rubber waterstop for test

项目	指标	
硬度/(°)	62.5	
拉伸强度/MPa	23.5	
拉断伸长率/%	548	
压缩永久变形/%	70 °C×24 h, 25%	33
	23 °C×168 h, 25%	18
热空气老化 70 °C×168 h	硬度变化(邵尔 A)/(°)	+2
	拉伸强度/MPa	15
	拉断伸长率/%	425

1.2 橡胶硬度

橡胶硬度的测量按照《硫化橡胶或热塑性橡胶压入硬度试验方法 第1部分:邵氏硬度计法(邵氏硬度)》(GB/T 531.1—2008)中规定的步骤进行,试样的尺寸为50 mm×30 mm×10 mm(长×宽×厚),测量时在试样表面相距6 mm的不同位置测量硬度值5次,取其平均值。结果见图3。

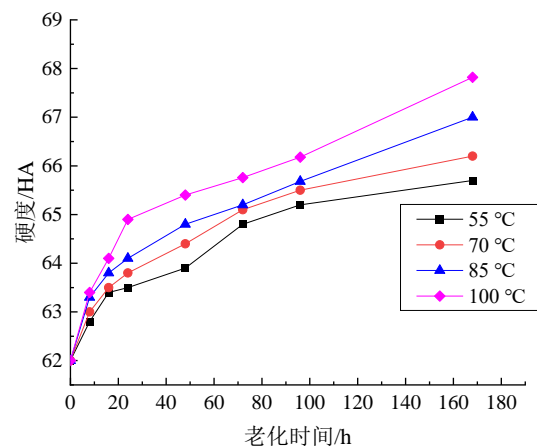


图3 橡胶硬度的变化规律

Fig. 3 Variation of rubber hardness

同一老化温度下,橡胶试样的邵氏 A 硬度随老化时间呈现出逐渐增大的变化趋势;并且前 24 h 硬度的变化幅度较大,之后变化的幅度较小,逐渐趋于平缓。例如在 100 °C 下前 24 h 硬度从 62.5 HA 上升到 65 HA, 24~168 h 时硬度从 65 HA 上升到

68 HA。可以看出,高温会使橡胶材料发生硬化,温度越高,橡胶的硬度越大,硬化程度越明显。

1.3 橡胶拉伸性能

橡胶拉伸性能的测试按照《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)中的方法进行。其中拉伸试样选择2型哑铃状拉伸试样,拉力试验采用位移控制,夹持器移动速度设置为500 mm/min,如图4所示。由于试验过程中不可避免地会出现试样脱落或断在试验段以外的情况,故每组试验选用5片哑铃状试样,保证每组至少获得3个有效实验数据,取均值作为最后测定结果。实验结果如图5和图6所示。

从拉断伸长率的测试结果可以看出,同一老化温度下,橡胶试样的拉断伸长率随着老化时间的增加而呈现出逐渐下降的变化趋势,且温度越高,拉断伸长率的降低幅度越大;例如100℃下老化的橡胶材料拉断伸长率从548%下降到257%,下降了约55%;而55℃下的橡胶拉断伸长率从548%下降到449%,仅下降了19%。温度较低的55℃、70℃时拉断伸长率变化幅度较小,温度较高的85℃、100℃时拉断伸长率变化幅度较大。并且同一老化温度下,拉断伸长率的变化幅度逐渐减小。以上结果表明经高温老化后橡胶的延性逐渐变差,脆性逐渐增大。

通过图6的测试结果可以看出,同一温度下橡胶的拉伸强度随老化时间的增加而逐渐降低,并且温度越高,降低的幅度越大;温度较低的55℃、70℃时,拉伸强度随时间整体呈现出缓慢降低,最后趋于平缓的变化趋势,最大降低约10%;温度较高85℃、100℃时,拉伸强度随时间出现大幅度降低,并且在168h时仍没有趋于稳定,最大降低约50%。

橡胶拉伸强度与拉断伸长率的变化趋势较为相似,但拉伸强度离散型更大。原因是拉伸强度受到橡胶弹性模量 E 和应变 ε 的共同影响,随着材料的老化,橡胶硬度增大, E 随之增大,伸长率降低, ε 随之降低,故拉伸强度的变化具有更高的离散型。



图4 橡胶拉伸试验

Fig. 4 Rubber tensile test

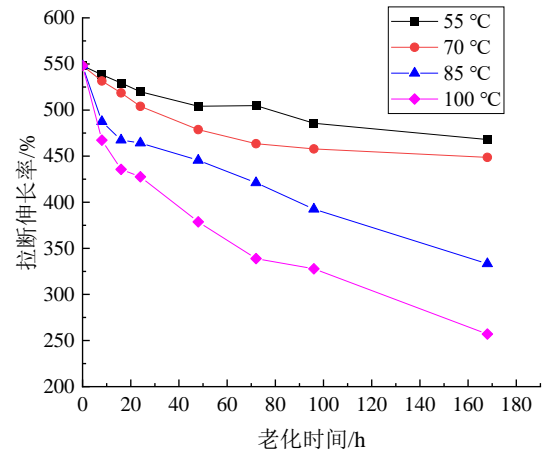


图5 拉断伸长率变化规律

Fig. 5 Variation of elongation at break

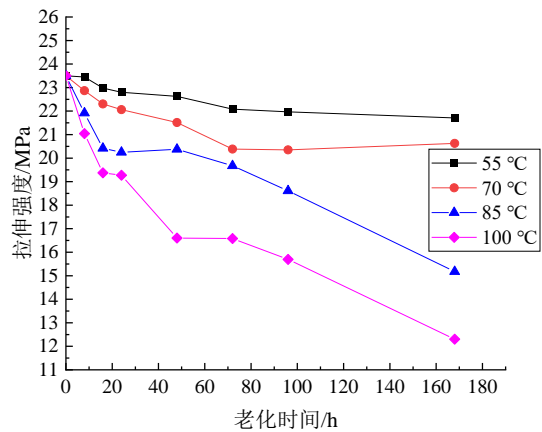


图6 拉伸强度变化规律

Fig. 6 Variation of tensile strength

2 橡胶 M-R 模型参数计算分析

橡胶属于超弹性材料,其本构关系可以由式(1)描述^[8]。

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} = 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 为第二类 Piola-Kirchhoff 应力张量的分量; W 为单位变形体积的应变能函数; E_{ij} 为 Green 应力张量的分量; C_{ij} 为 Cauchy 变形张量的分量。Mooney 于 1940 年提出了一种模型,经 Rivlin 的完善形成了 Mooney-Rivlin 模型(以下简称 M-R 模型),是目前数值计算中最为广泛的一种超弹性本构模型^[9],其常用的简化形式如下,其中应变能 W 是关于 I_1 和 I_2 的线性函数, C_{10} 和 C_{01} 是需要确定的参数。

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

超弹性不可压缩材料的本构方程可以表示为:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} C_{ij} - \frac{\partial W}{\partial I_2} C_{ij}^{-1}\right) \quad (3)$$

式中： σ_{ij} 为Cauchy（真实）应力张量的分量； p 为静水压力； δ_{ij} 为Kronerker算符，假设变形的主方向为坐标轴方向，则Cauchy变量张量用矩阵形式表示为：

$$C = \begin{pmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中： λ_i 为*i*方向的主伸长比， $\lambda_i = 1 + \varepsilon_i$ ； ε_i 为*i*方向工程应变主值，所以， C_{ij} 的不变量表示为：

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (5)$$

由不可压缩条件： $\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$ ，考虑试样简单受拉即一个方向受拉另两个方向自由，假设受力方向为1，则有 $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$ ， $\lambda_2 = \lambda_3$ ，给定伸长比 $\lambda_1 = \lambda$ ，则：

$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2} \quad (6)$$

$$\sigma_{11} = -p + 2\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \lambda^2 - \frac{\partial W}{\partial I_2} \lambda^{-2}\right) \quad (7)$$

$$\sigma_{22} = -p + 2\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} \lambda^{-1} - \frac{\partial W}{\partial I_2} \lambda\right) = 0 \quad (8)$$

由式（8）解出 p ，带入式（7）得：

$$\sigma_{11} = 2(\lambda^2 - \lambda^{-1})\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \lambda^{-1}\right) \quad (9)$$

在Mooney-Rivlin模型中：

$$\frac{\partial W}{\partial I_1} = C_{10}, \quad \frac{\partial W}{\partial I_2} = C_{01} \quad (10)$$

因此式（9）可改写为式（11）：

$$\sigma_{11} = 2(\lambda^2 - \lambda^{-1})(C_{10} + C_{01} \lambda^{-1}) \quad (11)$$

根据拉伸试验的结果，以 $\sigma/(\lambda^2 - \lambda^{-1}) - \lambda^{-1}$ 制图，并进行统计回归分析，便可以得到橡胶材料的本构参数 C_{10} 和 C_{01} ，计算出的结果见图7和图8。

由计算结果可知， C_{10} 在55℃和70℃下随时间呈现出缓慢增大的趋势，但变化的幅度较小，不超过20%；当温度升高至85℃和100℃时， C_{01} 随时间增大的幅度开始变大，最大变化量超过60%。

与 C_{10} 相反， C_{01} 则呈现出随时间逐渐减小的变化趋势，同样在较低温度时变化幅度较小，约为7%，而在较高温度下其降低的幅度较大，约为40%。

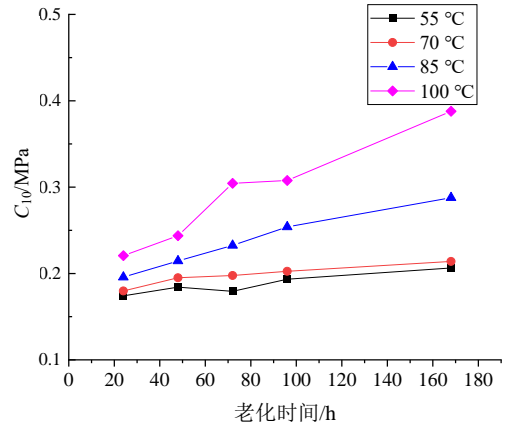


图7 C_{10} 变化规律图

Fig. 7 Variation of C_{10}

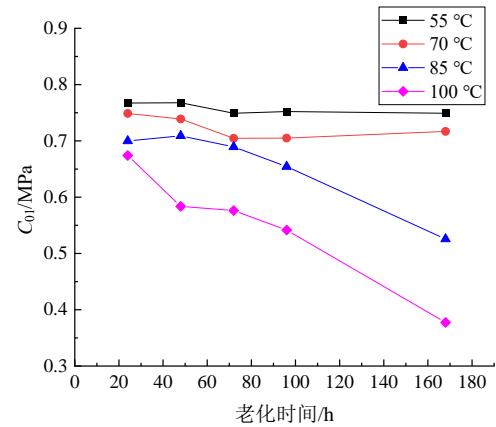


图8 C_{01} 变化规律图

Fig. 8 Variation of C_{01}

将本构参数的计算结果与前面的材料性能参数比较，可以看出， C_{10} 的变化特征与橡胶硬度类似，而 C_{01} 的变化特征则与橡胶拉断伸长率类似，进一步使用下列公式计算其皮尔逊相关系数：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (12)$$

经计算， C_{10} 与橡胶硬度之间的平均相关系数 $r = 0.974$ ， C_{01} 与橡胶拉断伸长率之间的平均相关系数 $r = 0.864$ 。经过上述计算可以推断出，橡胶M-R模型本构参数中的 C_{10} 能够在一定程度上体现出橡胶材料硬度方面的性能特征，而 C_{01} 则体现出了橡胶材料变形性能的特性。

3 橡胶止水带长期性能预测

橡胶止水带使用过程主要是发生热氧老化，根据热空气老化试验的结果可以建立其长期性能的

预测模型。常见的预测模型有 Dakin 线性公式、动力学曲线模拟、数学模型和神经网络等^[10-12], 表 3 对前人所使用的预测模型和研究成果进行了总结。

本文选用动力学曲线模型二元“ $P-t$ 模型”进行建模, 老化性能指标 y 与老化时间 t 之间的关系可以用以下经验公式描述, 由于橡胶拉伸强度的变化较离散, 故选用拉断伸长率作为性能预测指标。

表 3 前人研究成果汇总表^[13-16]
Table 3 Summary of previous research

研究材料	预测模型	结果
盾构隧道 EPDM	二元“ $P-t$ 模型”	百年后性能保持率 68%
橡胶密封垫	三元“ $P-T-t$ 模型”	百年后性能保持率 83%
类矩形隧道 EPDM 橡胶密封垫	二元“ $P-t$ 模型”	百年后性能保持率 41%
塑钢窗 EPDM 密封胶条	二元“ $P-t$ 模型”	30℃、拉断伸长率保持率 70%时使用寿命为 68 年

$$y = Be^{-Kt^\alpha} \quad (13)$$

式中: y 为老化性能指标, 此处为拉断伸长率折减率; B 为试验常数; K 为速度常数, d^{-1} ; τ 为老化时间, d ; α 为经验常数。

其中速度常数 K 与老化温度 T 之间的关系服从 Arrhenius 公式^[17]:

$$K = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (14)$$

利用 Python 程序建立模型, 对试验数据进行拟合, 得到相关的参数拟合值如表 4 所示。

表 4 拟合参数结果表
Table 4 Fitting results of parameters

拟合参数	结果
α	0.38
B	1.016
A	11 668
E/R	3 942
r	-0.982

带入式 (12) 可以得到以拉断伸长率为老化性能指标的橡胶止水带老化性能预测函数以及老化性能预测曲线。由于橡胶止水带在地表以下工作, 温差变化不大, 本文假定其使用温度恒定为 20℃。

$$y = 1.016 \times \exp(-10^{(4.067-1.711.53/T_0)} \times \tau^{0.38}) \quad (15)$$

由图 9 可以看出, 橡胶材料的老化在前 20 年表现的十分明显, 20 年时其性能仅为初始时的 60%; 之后其性能的变化逐渐趋于稳定, 预计在 100 年后性能残存率为 40.9%。即如果设计时橡胶止水带能够承受的最大变形为 30 mm, 在使用百年后, 当变形达到 12.3 mm 时材料就会发生破坏。

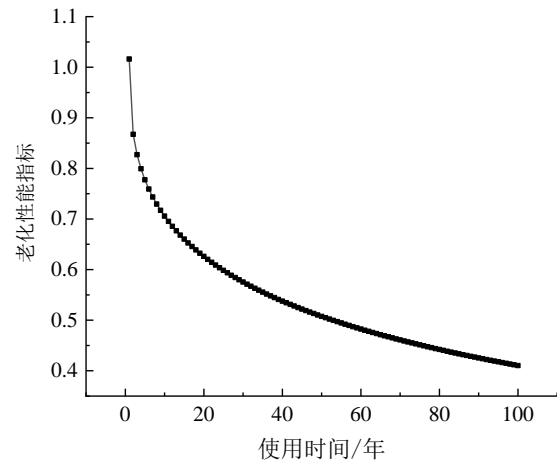


图 9 橡胶性能老化预测结果图

Fig. 9 Prediction of rubber aging

4 结 论

(1) 开展了橡胶止水带热空气老化试验, 实验表明橡胶硬度随着老化时间的增加而逐渐增大, 且温度越高, 增大的幅度越大; 橡胶拉断伸长率、拉伸强度均随老化时间的增加而减小, 且温度越高, 减小的幅度越大。

(2) 利用实验数据计算了橡胶 Mooney-Rivlin 模型本构参数 C_{10} 和 C_{01} 及其变化趋势, 通过与上一小节的比较可知, C_{10} 与橡胶硬度、 C_{01} 与橡胶变形性能之间具有较高的相关性, 能在一定程度上反映橡胶这两个方面的性能变化特征。

(3) 利用热空气老化的试验结果, 结合经验公式和 Arrhenius 公式外推得到了橡胶止水带老化性能的预测模型。结果表明, 以拉断伸长率为指标进行预测时, 止水带百年后的变形性能仅为初始时的 40.9%。

参考文献

[1] 尹韶哲. 地下工程渗漏原因及防治技术研究与应用[J]. 建筑, 2020(16): 78-80.

YIN Shao-zhe. Research and application of leakage causes

- and prevention technology of underground engineering[J]. *Architecture*, 2020(16): 78-80.
- [2] 刘强. 大断面临海隧道结构防排水技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
LIU Qiang. Structural waterproofing and drainage technology of large section near sea tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [3] 龚晓南, 郭盼盼. 隧道及地下工程渗漏水诱发原因与防治对策[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(7): 1-30.
GONG Xiao-nan, GUO Pan-pan. Induced causes and prevention countermeasures of water leakage in tunnel and underground engineering[J]. *Chinese Journal of Highway*, 2021, 34(7): 1-30.
- [4] 林品杰, 赵志红, 范宝秀, 等. 管廊变形缝橡胶止水带的变形能力及尺寸优化分析[J]. *科技通报*, 2020, 36(10): 57-63.
LIN Pin-jie, ZHAO Zhi-hong, FAN Bao-xiu, et al. Deformation capacity and size optimization analysis of rubber waterstop in deformation joint of pipe gallery[J]. *Science and Technology Bulletin*, 2020, 36(10): 57-63.
- [5] 张晓东, 孙攀. 隧道衬砌环向中埋式止水带安装工艺与质量控制[J]. *中国建筑防水*, 2020(增刊 1): 41-44, 48.
ZHANG Xiao-dong, SUN Pan. Installation technology and quality control of circumferential buried waterstop in tunnel lining[J]. *China Building Waterproof*, 2020(S1): 41-44, 48.
- [6] 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.
SHEN Jia-jia. Study on evolution of impermeability and durability of segment joints in metro shield tunnel[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [7] 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 Zi-xin, ZHANG Jia-qi, HUANG Xin, et al. Experimental study on long-term waterproof performance prediction of shield tunnel gasket[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Edition*, 2020, 54(1): 118-125.
- [8] 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(增刊 2): 427-430.
ZHANG Liang, LI Zhong-hua, MA Xin-qiang. Study on parameter characteristics of rubber Mooney Rivlin hyperelastic constitutive model[J]. *Noise and Vibration Control*, 2018, 38(S2): 427-430.
- [9] 王国权, 刘萌, 姚艳春, 等. 不同本构模型对橡胶制品有限元法适应性研究[J]. *力学与实践*, 2013, 35(4): 40-47.
WANG Guo-quan, LIU Meng, YAO Yan-chun, et al. Study on adaptability of different constitutive models to finite element method of rubber products[J]. *Mechanics and Practice*, 2013, 35(4): 40-47.
- [10] 胡文琪. 橡胶老化寿命的神经网络预测及软件开发[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
HU Wen-qi. Neural network prediction and software development of rubber aging life[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.
- [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 Yan, FENG De-he, WANG Feng, et al. Study on thermal oxidative aging properties and life prediction of EPDM[J]. *Special Rubber Products*, 2022, 43(1): 1-4.
- [12] 陈明明. 列车荷载作用下地铁扣件轨下橡胶垫板疲劳寿命预测与结构优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
CHEN Ming-ming. Research on fatigue life prediction and structural optimization of rubber pad under subway fastener rail under train load[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [13] 丁文其, 赵伟, 彭益成, 等. 盾构隧道防水密封垫长期防水性能预测方法研究[C]//*水下隧道建设与管理技术论文集*. 南京, 2013: 28-33.
DING Wen-qi, ZHAO Wei, PENG Yi-cheng, et al. Research on prediction method of long-term waterproof performance of waterproof gasket in shield tunnel[C]//*Collection of Technical Papers on Underwater Tunnel Construction and Management*. Nanjing, 2013: 28-33.
- [14] 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 Yang, MENG Wei, DENG Wen-wu. Study on section form design and durability of rubber gasket of shield segment[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2016, 33(4): 45-49.
- [15] 刘建国, 陈凯, 刘喜东, 等. 类矩形盾构隧道密封垫耐久性分析[J]. *现代隧道技术*, 2016, 53(增刊 1): 158-163.
LIU Jian-guo, CHEN Kai, LIU Xi-dong, et al. Durability

