



感潮河段船闸止水材料本构模型参数研究^{*}

吴林键¹, 赵 岳¹, 刘永明², 刘明维¹, 陈宗楠¹, 张 旭¹

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 水利水运工程教育部重点实验室重庆, 重庆 400074;

2. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401174)

摘要: 船闸止水材料老化导致结构缝渗透问题已久, 位于感潮河段的某运河最末一级船闸由于受外海咸水入侵的影响以及闸室频繁灌卸水作用, 加上强紫外光线的照射, 导致船闸结构缝止水带易老化。为避免上述问题, 选用高性能橡胶作为止水材料, 但用于描述该材料在复杂服役环境下力学行为演变的本构模型参数尚未可知。为此, 开展了船闸止水材料在紫外老化与咸水高频干湿交替环境下的加速劣化试验以及单轴拉伸试验, 研究普通、OMEGA、GB、超高性能止水带这 4 类橡胶止水带在该环境下的应力-应变关系曲线随时间的演变规律。结果表明: 随着时间的增加, 4 类止水材料的应力-应变关系曲线呈衰减的趋势。通过回归拟合不同橡胶材料力学本构参数的散点值, 得到不同老化时间下止水材料应力与伸长率的时变关系, 实现了对 Mooney-Rivlin 2 参数模型的改进, 最终结合试验加速比, 由试验环境换算得出自然老化环境下 4 类止水材料的力学本构参数, 为类似环境中船闸的设计和维修提供了参考。

关键词: 船闸; 止水材料; 本构模型; 紫外老化; 咸水入侵

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0103-07

Constitutive model parameters of water-stop materials for ship lock in tidal river sections

WU Linjian¹, ZHAO Yue¹, LIU Yongming², LIU Mingwei¹, CHEN Zongnan¹, ZHANG Xu¹

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation,

Key Laboratory of the Ministry of Education on Hydraulic & Water Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute of the Yangtze River, Chongqing 401147, China)

Abstract: The problem of water seepage through structural joints caused by the aging of water-stop materials in ship locks has persisted for a long time. The last-level ship lock of a canal situated in a tidal river section is particularly prone to the aging of structural joint water-stop due to the combined effects of saltwater intrusion from the open sea, frequent filling and draining of the lock chamber, and prolonged exposure to intense ultraviolet light. To avoid the above problems, high-performance rubber is selected as the water-stop material. However, the constitutive model parameters used to describe the mechanical behavior evolution of the material under complex service conditions have not yet been determined. Therefore, this article conducts accelerated degradation tests and uniaxial tensile tests on water-stop materials under conditions ultraviolet aging and high-frequency dry-wet alternation of saline water environment, and studied the evolution laws of stress-strain relationship curves of four types of rubber waterstops, namely ordinary, OMEGA, GB and ultra-high performance waterstops, over time in this environment. The results indicate that with the increase of time, the stress-strain relationship curves of the four types of waterproofing materials show a decreasing trend. By regression fitting the scatter values of mechanical constitutive parameters of different rubber materials, the time-varying relationship between stress and elongation of waterproofing materials under different aging times is obtained, which improved the Mooney-Rivlin 2 parameter model. Finally,

收稿日期: 2025-03-07

***基金项目:** 国家自然科学基金项目(52209156)

作者简介: 吴林键(1990—), 男, 博士, 副教授, 从事港口工程设计计算理论的教学研究工作。

combined with the experimental acceleration ratio, the mechanical constitutive parameters of four types of water-stop materials under natural aging conditions are converted from the experimental environment, providing reference for the design and maintenance of ship locks in similar environments.

Keywords: ship lock; water-stop material; constitutive model; ultraviolet aging; saltwater intrusion

船闸是我国常见的内河水利枢纽通航构筑物,目前我国已经建成大小船闸 800 多座^[1],而船闸结构缝渗漏是船闸工程中常见的问题,主要发生在结构接缝处,可能影响船闸的正常运行和安全。现有船闸结构缝主要采用多层止水材料相结合的止水结构形式,止水材料耐老化性差是导致船闸止水结构失效的主要原因^[2]。位于感潮河段的船闸,由于其特殊的地理位置,上游径流量小,下游受盐水上溯入侵,同时船闸结构还会受到闸室频繁灌卸水作用,再加上该地区紫外光线的照射,使得感潮河段船闸的服役环境更加恶劣。针对这种恶劣的服役环境,吴林键等^[3]通过研究强紫外光照、氯盐侵蚀及高频干湿交替共同影响的特殊腐蚀环境下,OMEGA 止水带(简称 OM)、超高性能止水带(简称 CG)、GB 止水带(简称 GB)以及普通橡胶止水带(简称 PT)4 种不同船闸止水材料性能劣化规律发现,4 类橡胶止水带材料的硬度、拉伸强度、断裂伸长率均随劣化时间呈减小趋势,为感潮河段船闸结构缝止水材料的优选类型提供了重要参考依据。上述研究只针对 4 种船闸止水材料在宏观性能上衰减的规律进行分析总结,但是随着老化时间的增加,止水材料的力学本构参数也会随之发生改变。然而,针对这一系列橡胶止水带材料在上述特殊服役环境下力学本构模型参数变化规律暂不明确。有必要开展针对船闸橡胶止水带材料在紫外老化与咸水高频干湿环境下力学本构模型参数变化的研究。

止水材料与普通金属材料不同,其受力变形具有明显的非线性特性,属于典型的超弹性体。目前,国内外针对橡胶材料的力学本构参数开展相关了研究。Shi 等^[4]开展了三元乙丙(EPDM)橡胶材料在地下水环境下的加速老化试验。研究材料老化后的力学性能变化规律,提出了 EPDM 橡

胶材料的时变力学本构参数表达式,建立橡胶材料的力学本构模型,能够较好地模拟材料在不同加载条件下的应力-应变响应,可以更准确地预测 EPDM 橡胶材料在长期使用中的性能退化。Huang 等^[5]探究了温度对氢化丁晴橡胶(HNBR)力学本构模型的影响。依据室内加速老化试验测试得到试验数据,分析几种常见的超弹性本构模型,得出杨氏模型最适合 HNBR 材料,模型能够较好地拟合试验数据,并预测材料在不同温度下的应力-应变响应。Sang 等^[6]基于有限变形理论,提出了聚合物橡胶的新本构模型。其力学本构关系可简化为 Mooney-Rivlin 模型与 Neo-Hookean 模型,并通过实例验证了新的力学本构模型能准确地反应聚合物橡胶材料的变形特性。Buchen 等^[7]基于球壳模型,推导低密度泡沫橡胶的力学本构模型。反映了材料的孔弹性和黏弹性,将推导的力学本构模型二次开发到有限元软件中,并结合 EPDM 橡胶松弛拉伸试验对材料力学本构进行了标定。

综上,现有研究主要以天然橡胶、三元乙丙橡胶、丁晴橡胶等为研究对象,通过最小二乘法、有限元拟合法等拟合橡胶材料力学本构参数^[8-10],分析橡胶材料在不同力学本构模型的适应性。但在高温、强紫外光照以及盐水高频干湿交替环境共同作用下,船闸止水材料的力学本构参数演化规律暂不明确。因此本文选取 OMEGA 止水带、超高性能止水带、GB 止水带以及普通橡胶止水带 4 类止水材料,开展紫外老化与咸水高频干湿交替环境下止水材料力学本构模型参数研究,建立在不同老化时间下止水材料力学本构参数的时变模型。

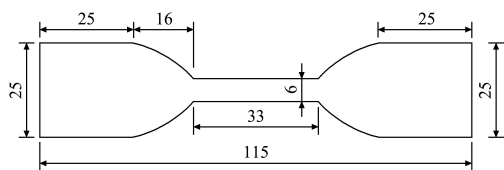
1 试验研究

1.1 试验材料与试件制样

参考 GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑橡胶拉

伸应力应变性能的测定》^[11] 规程, 将 4 类橡胶止水带的试验试样加工成尺寸为 115 mm×25 mm×6 mm

的哑铃状, 见图 1a), 试样狭窄部宽度为 6 mm, 制备的试验试样见图 1b)。



a) 橡胶止水带尺寸(单位: mm)



b) 橡胶止水带试样

图 1 橡胶止水带试验试样及尺寸

Fig. 1 Rubber water-stop test samples dimension

1.2 试验方案设计

本文采用室内加速老化试验, 有效缩短试验周期, 合理设置试验条件有效模拟真实服役环境下橡胶材料性能劣化^[12]。依据止水材料加速老化试验, 测得不同老化时间下 4 类止水材料的应力-应变曲线。本文将依据 Arrhenius^[13] 人工加速公式推导出的试验加速比, 换算得到自然老化环境下 4 类止水材料时变力学本构模型的参数值。

$$K_d = \frac{t}{t_\gamma} = \exp \left[\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{real}}} - \frac{1}{T_{\text{test}}} \right) \right] \quad (1)$$

式中: t 为橡胶材料在真实环境中的使用时间, a; t_γ 为试验加速老化时间, a; E_a 为活化能, J/mol; R 为气体常数, 取 8.314 J/(mol·K); T_{real} 为真实环境温度, K; T_{test} 为试验加速劣化环境温度, K。

根据文献[14], 按 Arrhenius 人工加速公式反算得到 $E_a = 99.4$ kJ/mol; 参考规范 GB 20688.1—2007《橡胶支座第 1 部分: 隔震支座橡胶试验方法》^[15], 为了避免温度过高导致橡胶止水带内部发生剧烈的化学反应, 止水材料加速老化试验的试验温度应低于 80 ℃, 结合试验仪器的设置要求, 试验温度取 63 ℃ (336.15 K)。广西历年月平均温度绝大部分在 20 ℃ 以上, 因此模拟实际环境中的真实温度取 20 ℃ (293.15 K)。根据位于感潮

河段的某运河最末一级船闸闸室灌泄水的水位历时曲线, 船舶双向过闸时间为 80 min, 试验干湿比取 40:40 (1:1)。根据上述的参数取值, 确定止水材料在室内加速老化与实际环境下自然老化的换算比, 见表 1。

表 1 试验方案具体参数

Tab. 1 Specific parameters of test plan

试验材料 类型	总试验 时间/d	试验 加速比	试验 温度/K	实际环境 温度/K	活化能/ (kJ·mol ⁻¹)
止水材料	40	184	336.15	293.15	99.4

根据上述参数设置 4 类橡胶止水带在紫外老化与咸水高频干湿交替共同作用下的室内加速老化试验, 具体试验工况见表 2。由于船闸受到咸水入侵, 导致闸室内海水氯盐浓度低于 3.5%, 试验中取氯盐浓度为 1%。试验过程中, 样品首先在紫外加速老化箱中老化 40 min, 随后将外部配制的盐溶液注入试验盒中浸泡 40 min, 最后将盐溶液排出, 完成 1 次紫外老化和咸水干湿交替循环。整个过程在紫外老化条件下进行, 每天共进行 18 次干湿循环。将各工况完成老化试验的试样进行单轴拉伸试验, 试验仪器采用 STS5000 微机控制电子万能试验机, 获取止水材料在不同老化时间作用下的应力-应变曲线。

表 2 试验工况

Tab. 2 Test conditions

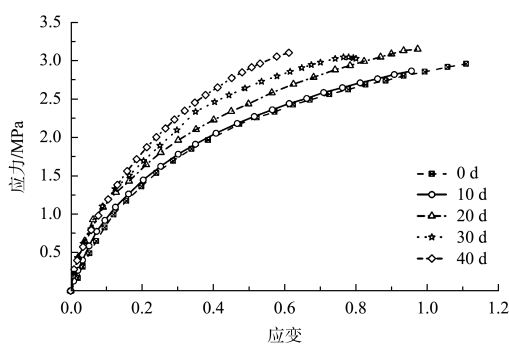
材料类型	试验环境	干湿比	时间/d	备注
4 类止水材料 (PT、OM、GB、CG)	紫外老化与盐水高频干湿交替环境	1:1	0、10、20、30、40	均设置 3 个平行样

2 结果与分析

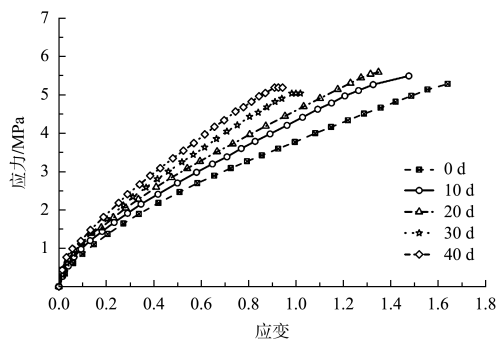
2.1 止水材料应力-应变演变规律

当干湿比为 1:1 时,在紫外老化与盐水高频干湿交替作用下止水材料的应力-应变劣化规律见图 2。随着试验时间的增加,4 类止水材料的应力-应变关系曲线呈衰减的趋势,其中,PT、CG 止水材料的应力-应变关系曲线衰减趋势尤为明显,而 OM、GB 止水材料的应力-应变关系曲线衰减趋势相差较小。造成止水材料应力-应变衰减的主要原因在于紫外老化与盐水高频干湿交替作用下,止水材料的所能承受的最大拉力呈下降的趋势,且所能承受的最大点变形也呈下降趋势,其中,止水材料的最大点变形的衰减速率相比于最大拉力的衰减速率更大,进而导致止水材料的应力-应变关系曲线的劣化。

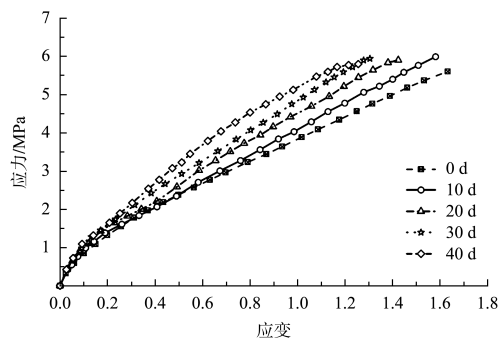
当试验进行到 40 d 时,4 类止水材料达到最大应力值。其中,PT 止水材料所能承受的最大应力值最小,其最大应力为 3 MPa,而 OM 与 GB 止水材料所能承受的最大应力值相差较小,其最大应力值为 5~6 MPa,CG 止水材料所能承受的最大应力值最大,其最大应力值为 16 MPa。



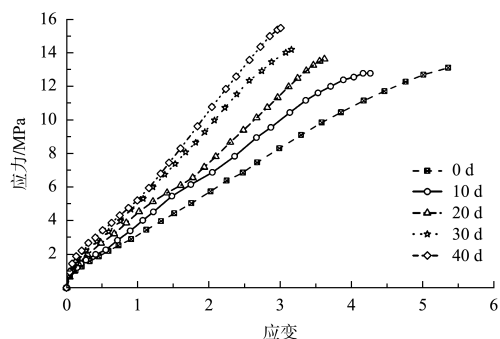
a) PT止水材料



b) OM止水材料



c) GB止水材料



d) CG止水材料

图 2 4 类止水材料应力-应变劣化规律
Fig. 2 Stress-strain degradation law of four types of water-stop materials

2.2 止水材料力学本构模型参数的确定

基于上述 4 种止水材料的应力-应变曲线,采用 ANSYS 有限元软件对橡胶材料的力学本构参数进行拟合及计算。由于 4 类止水材料的自身属性存在差异性,本文研究采用自定义的形式来定义材料属性。首先,定义材料的名称,点击单轴拉伸试验测试数据框,力学本构模型选用 Mooney-Rivlin 2 参数模型^[16-17],简化后形式如式(2)^[18-19],将试验获取的应力-应变曲线导入到单轴拉伸试验的测试框中,点击求解曲线拟合,即可获得 Mooney-Rivlin 2 参数模型的力学本构参数。

$$\delta_1 = 2 \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1} \right) \left(C_{10} + \frac{1}{\lambda_1} C_{01} \right) \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} C_{10} = \partial W / \partial I_1 \\ C_{01} = \partial W / \partial I_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: δ_1 为主应力; λ_1 为主伸长比; W 为应变能函数; I_1 、 I_2 为 Green 应变不变量。

基于 ANSYS 非线性拟合方法,结合 4 类止水材料在紫外老化与盐水干湿(干湿比 1:1)环境下应

力-应变曲线, 拟合得到在该环境下 4 类止水材料

Mooney-Rivlin 2 参数模型的本构参数, 见表 3。

表 3 4 类止水材料本构参数

Tab. 3 Constitutive parameters of four types of water-stop materials

环境 干湿比	试验 时间/d	PT		OM		GB		CG	
		C_{01} /MPa	C_{10} /MPa	C_{01} /MPa	C_{10} /MPa	C_{01} /MPa	C_{10} /MPa	C_{01} /MPa	C_{10} /MPa
1:1	0	1.630	-0.009	0.880	0.656	0.720	0.750	0.120	0.980
	10	2.393	-0.463	1.260	0.580	0.780	0.800	0.170	1.140
	20	2.923	-0.666	1.548	0.513	0.860	0.840	0.250	1.290
	30	3.410	-0.941	1.800	0.440	0.930	0.900	0.310	1.500
	40	3.780	-1.200	2.090	0.360	0.980	0.950	0.390	1.590

2.3 不同老化时间下止水材料力学本构参数的时变模型

根据 ANSYS 拟合得到的 Mooney-Rivlin 2 参数模型的力学本构参数散点值, 回归拟合得到力学本构参数在紫外老化与盐水高频干湿交替 (1:1) 试验环境下的时变模型, 见图 3。4 类止水材料的 Mooney-Rivlin 2 参数模型的力学本构参数 C_{01} 、 C_{10} 都呈线性关系。其中, PT、OM 止水材料的 Mooney-Rivlin 2 参数模型的力学本构参数 C_{01} 、 C_{10} 变化趋势一致, GB、CG 止水材料的力学本构参

数 C_{01} 、 C_{10} 变化趋势保持一致。进而可将 Mooney-Rivlin 2 参数模型进行改进, 得到 Mooney-Rivlin 2 参数的时变模型, 见式(4), 并将模型参数进行统计, 见表 4, 该模型反映了 4 类止水材料在上述试验环境及老化时间下应力与伸长率的时变规律。

$$\begin{cases} \delta_1 = 2 \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1} \right) \left[C_{10}(t) + \frac{1}{\lambda_1} C_{01}(t) \right] \\ C_{01}(t) = a_1 + b_1 x \\ C_{10}(t) = a_2 + b_2 x \end{cases} \quad (4)$$

式中: a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 为拟合参数; x 、 t 为时间。

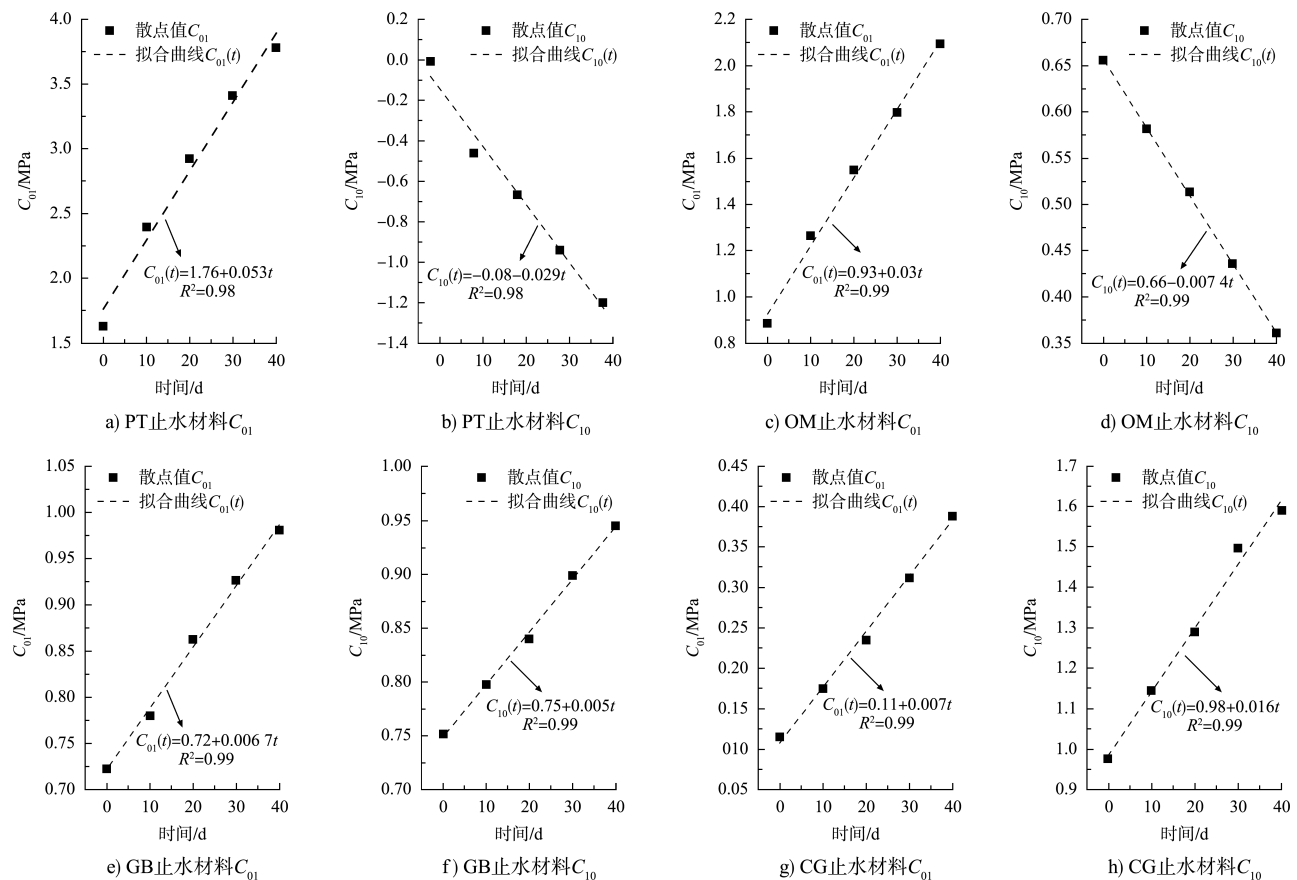


图 3 4 类止水材料本构参数变化规律

Fig. 3 Variation of constitutive parameters of four types of water-stop materials

表 4 试验环境 4 类止水材料时变本构模型参数
Tab. 4 Time-varying constitutive model parameters
for four types of water-stop materials
under experimental conditions

时变模型	材料类型	a_1	b_1	a_2	b_2
$y=a+bx$	PT	1.76	0.053	-0.08	-0.029
	OM	0.93	0.030	0.66	-0.007
	GB	0.72	0.007	0.75	0.005
	CG	0.11	0.007	0.98	0.016

为了反应在自然老化环境下 4 类止水材料力学本构参数的时变规律, 结合表 1 中试验加速比, 换算得到在自然老化环境下 4 类止水材料时变力学本构模型参数值, 见表 5。通过表中所统计的拟合参数可知, 4 种止水材料的本构参数 C_{01} 随时间增大均呈现增长的趋势, 其中对时间最为敏感的是 PT 止水材料, 试验环境 b_1 为 0.053, 自然老化环境下 b_1 为 0.106, 对于本构参数 C_{10} , PT、OM 止水材料表现为随时间增加数值逐渐减小的趋势, 而 GB、CG 止水材料则表现为随时间增加数值逐渐增大的趋势, 其中对时间最为敏感的同样是 PT 止水材料, 试验环境 b_2 为 -0.029, 自然老化环境下 b_2 为 -0.058。

表 5 自然老化下 4 类止水材料时变本构模型参数
Tab. 5 Time-varying constitutive model parameters
for four types of water-stop material
under natural aging

时变模型	材料类型	a_1	b_1	a_2	b_2
$y=a+bx$	PT	1.76	0.106	-0.08	-0.058
	OM	0.93	0.060	0.66	-0.015
	GB	0.72	0.013	0.75	0.010
	CG	0.11	0.014	0.98	0.032

3 结论

1) 4 类止水材料在加速老化环境下应力-应变关系曲线随时间的演变规律表现为随着试验时间的增加, 4 类止水材料的应力-应变关系曲线呈衰减的趋势, 其中, PT、CG 止水材料的应力-应变关系曲线衰减趋势显著, 而 OM、GB 止水材料的应力-应变关系曲线衰减趋势相差较小。

2) 基于 ANSYS 非线性拟合 Mooney-Rivlin 2 参数模型中材料参数的方法, 结合 4 类止水材料在不同加速老化环境下应力-应变曲线, 拟合得到

4 类止水材料的 Mooney-Rivlin 2 参数模型中的材料参数。

3) 分析 4 类止水材料在不同加速老化环境下 Mooney-Rivlin 2 参数模型的力学本构参数, 明确了力学本构参数 C_{01} 与 C_{10} 均呈良好的线性关系。通过回归拟合力学本构参数的散点值, 对 Mooney-Rivlin 2 参数模型进行改进, 得到不同老化时间下止水材料应力与伸长率的时变关系。结合试验加速比, 换算得到自然老化环境下 4 类止水材料的力学本构参数, 其中 PT 止水材料的力学本构参数对时间的敏感性最高。

参考文献:

- [1] 张利鹏. 高水头船闸水流三维数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
ZHANG L P. The 3D numerical simulation study on the turbulent flow of high head lock [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.
- [2] 张勇. 葛洲坝 1 号船闸结构缝漏水处理工程实践[J]. 水运工程, 2001(5): 58-61.
ZHANG Y. Engineering practice of leakage treatment for the structural joint of gezhouba No. 1 shiplock [J]. Port & waterway engineering, 2001(5): 58-61.
- [3] 吴林键, 刘永明, 刘明维, 等. 船闸止水材料性能劣化规律试验研究[J]. 水道港口, 2024, 45(3): 426-433, 440.
WU L J, LIU Y M, LIU M W, et al. Influence of salt-water intrusion and ship lock operation on properties' deterioration for water-stop material [J]. Journal of waterway and harbor, 2024, 45(3): 426-433, 440.
- [4] 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.
- [5] HUANG Y, LI Y X, ZHAO H, et al. Research on constitutive models of hydrogenated nitrile butadiene rubber for packer at different temperatures [J]. Journal of mechanical science and technology, 2020, 34 (1): 155-164.
- [6] SANG J B, SUN L F, XING S F, et al. Mechanical properties of polymer rubber materials based on a new

- constitutive model[J]. *Polymers and polymer composites*, 2014, 22(8): 693-698.
- [7] BUCHEN S, KRÖGER N H, REPPEL T, et al. Time-dependent modeling and experimental characterization of foamed EPDM rubber [J]. *Continuum mechanics and thermodynamics*, 2021, 33(4): 1747-1764.
- [8] 徐中明, 袁泉, 张志飞, 等. 基于超静定方程的橡胶材料本构模型参数识别[J]. *重庆大学学报*, 2017, 40(2): 1-9.
- XU Z M, YUAN Q, ZHANG Z F, et al. Parameter identification of constitutive models of rubber materials based on hyperstatic equations[J]. *Journal of Chongqing University*, 2017, 40(2): 1-9.
- [9] 黄敏, 黄舟, 贾东, 等. 基于压缩试验的两种橡胶材料本构模型分析[J]. *噪声与振动控制*, 2018, 38(S1): 483-486.
- HUANG M, HUANG Z, JIA D, et al. Constitutive models of two kinds of rubber material based on compression tests[J]. *Noise and vibration control*, 2018, 38(S1): 483-486.
- [10] 隋永强, 高磊, 王晓凡, 等. 橡胶材料本构模型辨识方法改进[J]. *轮胎工业*, 2019, 39(12): 713-717.
- SUI Y Q, GAO L, WANG X F, et al. Improvement of identification method for rubber material constitutive model[J]. *Tire industry*, 2019, 39(12): 713-717.
- [11] 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[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- Rubber, vulcanized or thermoplastic-determination of tensile stress-strain properties: GB/T 528-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [12] 周鑫, 丁孝均, 魏威. 加速老化试验方法评估典型橡胶密封材料贮存寿命的准确性研究[J]. *航天器环境工程*, 2014, 31(3): 287-291.
- ZHOU X, DING X J, WEI W. Accuracy on evaluation of natural storage life of rubbery sealing materials by using accelerated life method[J]. *Spacecraft environment engineering*, 2014, 31(3): 287-291.
- [13] 李艳敏, 马玉宏, 赵桂峰, 等. 海水干湿循环作用下天然橡胶支座橡胶材料性能劣化试验[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(14): 146-152, 222.
- LI Y M, MA Y H, ZHAO G F, et al. Experimental study on the property deterioration of rubber material used as natural rubber bearing under seawater wet-dry cycles[J]. *Journal of vibration and shock*, 2019, 38(14): 146-152, 222.
- [14] ITOH Y, YAZAWA A, KITAGAWA T, et al. Study on environmental durability of rubber bearing for bridges [C]// Nagoya University Nagoya. Towards a Better Built Environment-Innovation, Sustainability, Information Technology. Melbourne: [s. n.], 2002, 67(3): 88-96.
- [15] 橡胶支座第 1 部分: 隔震橡胶支座试验方法: GB/T 20688. 1—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- Rubber bearings-Part1: Seismic-protection isolators test methods: GB/T 20688. 1-2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [16] 杜畅. 北方冬季海洋环境对天然橡胶隔震支座的影响研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.
- DU C. Research on the influence of winter marine environment on natural rubber isolation bearings in the north of China[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018.
- [17] 特雷劳尔. 橡胶弹性物理学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1957.
- TRELOAR L R G. The physics of rubber elasticity[M]. Beijing: China Light Industry Press, 1957.
- [18] 黄庆专. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型及其系数最小二乘解法[J]. *热带农业科学*, 2009, 29(5): 20-24.
- HUANG Q Z. Rubber mooney-rivlin model and its modulus's least-square solution [J]. *Chinese journal of tropical agriculture*, 2009, 29(5): 20-24.
- [19] 李艳敏, 马玉宏, 罗佳润, 等. 考虑老化时间影响的隔震支座橡胶本构 Moony-Rivlin 模型常数研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(16): 164-169.
- LI Y M, MA Y H, LUO J R, et al. The effect of aging on the material constant of the rubber isolator's constitutive model Moony-Rivlin[J]. *Journal of vibration and shock*, 2016, 35(16): 164-169.

(本文编辑 赵娟)