

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240924004

高阻尼减振(震)橡胶材料力学性能试验研究*

董晗拓¹, 吴小蕙¹, 王彦峰¹, 周云², 曾振炜²

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510080;
2. 广州大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对现有土木工程结构和设备的减振(震)与隔振(震)橡胶材料耗能能力不足, 通过改变橡胶材料成分提升其耗能能力的同时其刚度会增加而影响其隔振(震)性能的问题, 设计了一种丁基橡胶基体新型高阻尼减振(震)橡胶材料。采用万能试验机对新型高阻尼减振(震)橡胶材料和普通橡胶材料进行了体积压缩、单轴、平面和等双轴拉伸往复变形条件下的材料力学性能试验, 根据滞回性能对比分析研究其力学性能提升效果。结果表明: 在体积压缩试验中, 新型高阻尼减振(震)橡胶的平均压缩弹性模量比普通橡胶压缩模量高约12.4%; 在单一方向变形的单轴拉伸试验中, 新型高阻尼减振(震)橡胶在150%变形以内比普通橡胶等效粘滞阻尼比和残余变形分别提升187.01%~391.67%和471.90%~625.60%, 拉伸刚度降低4.82%~62.36%; 在两个方向变形的平面和等双轴拉伸试验中, 新型高阻尼减振(震)橡胶在150%变形以内比普通橡胶等效粘滞阻尼比和残余变形分别提升63.73%~608.45%和365.66%~919.60%, 拉伸刚度降低25.90%~81.48%, 新型高阻尼减振(震)橡胶耗能提升效果明显, 耗能提升效果的同时其拉伸刚度降低。最后通过数值拟合得到能很好模拟此橡胶的非线性弹性行为的超弹性本构模型, 为此新型高阻尼减振(震)橡胶进一步研发与推广应用打下基础。

关键词: 高阻尼橡胶; 耗能提升效果; 材料力学性能试验; 高阻尼减振(震)橡胶; 等效粘滞阻尼比
中图分类号: TU591 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)04-0870-09

Experimental Study on Mechanical Properties of High-damping Rubber Material for Vibration (Seismic) Absorption

DONG Hantuo¹, WU Xiaohui¹, WANG Yanfeng¹, ZHOU Yun², ZENG Zhenwei²

(1. Power Grid Planning Research Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;
2. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Current rubber materials for vibration (seismic) absorption and isolation used in civil engineering structures and equipment have insufficient energy dissipation capacity, and enhancing the energy dissipation capacity by modifying the rubber material composition leads to increased stiffness and consequently compromises the vibration (seismic) isolation performance. To address these issues, a novel high-damping rubber material for vibration (seismic) absorption based on a butyl rubber matrix was designed. Mechanical property tests were conducted on both the novel high-damping rubber and conventional rubber materials under cyclic loading conditions of volumetric compression, uniaxial tension, plane tension, and equi-biaxial tension using a universal testing machine. The mechanical proper-

* 收稿日期: 2024-09-24; 修回日期: 2024-12-02

基金项目: 南方电网公司科技项目(GDKIXM20230429)资助

作者简介: 董晗拓(1995—), 男, 工程师, 硕士。主要从事结构工程方面的研究。E-mail: 7355544@qq.com

ty enhancement effects were studied through comparative analysis of the hysteresis performance. The results showed that in volumetric compression tests, the average compressive elastic modulus of the novel high-damping rubber was approximately 12.4% higher than that of ordinary rubber. In uniaxial tensile tests under single-direction deformation up to 150% strain, the novel high-damping rubber exhibited 187.01%~391.67% higher equivalent viscous damping ratio and 471.90%~625.60% greater residual deformation compared to ordinary rubber, and its tensile stiffness decreased by 4.82%~62.36%. In plane and equi-biaxial tensile tests under two-direction deformation up to 150% strain, the novel high-damping rubber showed 63.73%~608.45% higher equivalent viscous damping ratio and 365.66%~919.60% greater residual deformation than ordinary rubber, and its tensile stiffness decreased by 25.90%~81.48%. The novel high-damping rubber for vibration (seismic) absorption significantly improved energy dissipation capacity while reducing tensile stiffness. Finally, a hyperelastic constitutive model that could accurately simulate the nonlinear elastic behavior of the rubber was obtained through numerical fitting. This lays a foundation for the further development and application of the novel high-damping rubber material for vibration (seismic) absorption.

Keywords: high-damping rubber; energy dissipation enhancement effect; mechanical property testing of materials; high-damping rubber for vibration (seismic) absorption; equivalent viscous damping ratio

0 引言

近年来,随着现代设备、结构的复杂化与对安全性要求的提高,减、隔振(震)技术在土木工程等领域的应用越来越广泛^[1-3],尤其是在高烈度地区,设备与工程结构不仅要承受静载荷,还需应对频繁的动载荷,如设备本身的振动、地震、风载和交通振动等,这些动载荷对设备与结构的耐久性和安全性提出了更高的要求。传统橡胶材料在工程与设备隔震中已经有广泛应用,其优异的弹性和变形恢复能力使其成为理想的隔振(震)材料^[4]。然而,普通橡胶材料的能量耗散能力有限^[5-6],难以满足高烈度环境下的减、隔振(震)需求。高阻尼橡胶材料通过在橡胶基体中引入阻尼增强组分^[7-9],提高了材料的内阻尼^[10],使其在变形过程中能有效吸收和耗散能量^[11-12],从而减小结构或设备的地震响应,其因优异的能量耗散能力和力学性能稳定性^[13-14],逐渐成为解决这一问题的重要手段,国内外众多学者对其性能进行了研究^[7,15-20],但普通橡胶通过改变其材料成分来提升其耗能能力的同时通常会存在其刚度会增加而影响其隔振(震)性能的问题。

针对普通橡胶耗能能力不足与通过改变橡胶材料成分提升其耗能能力的同时其刚度会增加而影响其隔振(震)性能的问题,本文研发了一种丁基橡胶基体新型高阻尼减振(震)橡胶材料,通过对新



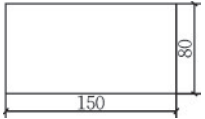
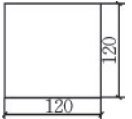
开发的高阻尼减振(震)橡胶材料进行体积压缩(Volume Compressibility)、单轴(Uniaxial Tensile)、平面(Plane Tensile)及等双轴(Constant Biaxial Tensile)拉伸力学性能试验,深入研究其在体积压缩、单轴、平面及等双轴拉伸变形条件下的力学性能表现,评估其非线性弹性行为和耗能特性的改进效果。

1 试验方案

1.1 试件设计与制作

本新型高阻尼减振(震)橡胶通过在丁基橡胶基体中增加炭黑和片状云母粉填充剂等制成。试验使用的试件为从橡胶试片上裁切,其中体积压缩试件为圆形试件,单轴拉伸试验试件采用规范^[21]中的5B型试件尺寸,平面拉伸试件为矩形试件,等双轴拉伸试件尺寸为120 mm的方片,所有试件厚度均为2 mm,试件形状尺寸见表1。

表1 试件尺寸

Table 1 Specimen dimensions				单位:mm
体积压缩	单轴拉伸	平面拉伸	等双轴拉伸	
				

1.2 试验概况与加载制度

本次试验共 24 个试件,高阻尼减振(震)橡胶(High damping Rubber for Vibration (Seismic) Absorption(HR))和普通橡胶(Ordinary Rubber(OR))材料各 12 个试件,分别对两种橡胶材料进行了体积压缩、单轴、平面和等双轴拉伸 4 种力学性能试验,为避免材料随机性与研究材料可靠性,所有试验均做了三次重复试验,试验采用非接触激光测距仪进行应变追踪测试,试验主要参考标准 GB/T2941—2006^[22]和 GB/T528—2009^[23]。体积压缩、单轴拉伸和平面拉伸试验采用 WDW-20 微控电子万能试验机进行加载,等双轴拉伸采用拉伸试验机进行加载,高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶分别进行了体积压缩比为 0.06-0.07-0.08 和 0.04-0.05-0.06 的逐级增幅体积压缩加载试验,压缩速率为 1.2 mm/min。拉伸试验加载制度见表 2。

表 2 加载制度
Table 2 Loading protocols

工况	拉伸应变幅值/%	应变速率/s	循环圈数
1	25		
2	50		
3	75	1%	5
4	100		
5	150		

2 试验现象

试验现象如图 1~4 所示。由图可知:高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶的试验现象相似。在压缩试验中,由于橡胶体积不可压缩性,橡胶在压缩方向上收缩的同时在横向上膨胀,表面变得更宽,橡胶表面出现褶皱,并且带有明显的压痕;而在单轴拉伸过程中,橡胶主要沿着加载方向变形,中间拉伸段拉长,表现为沿长度方向纵向的应变,且由于泊松效应,橡胶材料在拉伸的同时横向发生收缩,表面变得更窄,但试件表面并未出现裂纹等破坏现象,在中间加载段出现颈缩现象,出现明显的变窄和集中变形;在平面拉伸试验中,橡胶主要在平面内拉伸,厚度方向的变形较小,表面在拉伸方向明显延展,随着应变增加,试件表面出现褶皱;在等双轴拉伸试验中,橡胶在两个相互垂直的方向上均匀

拓展,表现为均匀的应变分布,由于双轴应力的均匀性,表面变得更加光滑。



图 1 体积压缩试验

Fig.1 Volumetric compression tests

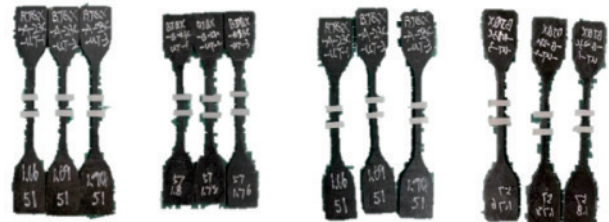


图 2 单轴拉伸试验

Fig.2 Uniaxial tensile tests

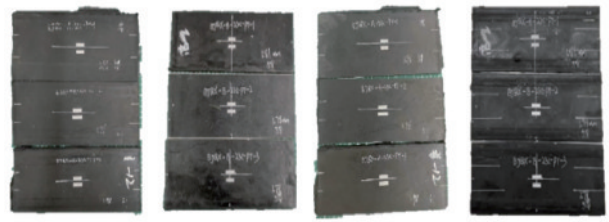


图 3 平面拉伸试验

Fig.3 Plane tensile tests

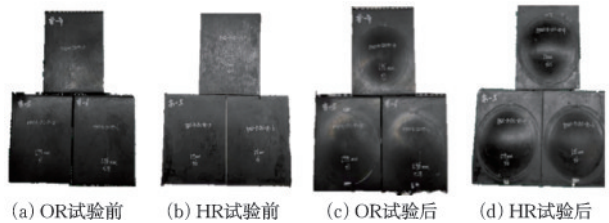


图 4 等双轴拉伸试验

Fig.4 Equi-biaxial tensile tests

3 试验结果分析与评价

3.1 压缩性能分析

高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶的体积压缩试验的应力与应变曲线如图 5 所示,力学性能指标如图 6 所示。可知:高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶体积压缩变形时均具备一定的滞回面积,具备一定的耗能能力,两种橡胶均存在明显的残余形变,高阻尼减振(震)橡胶的平均压

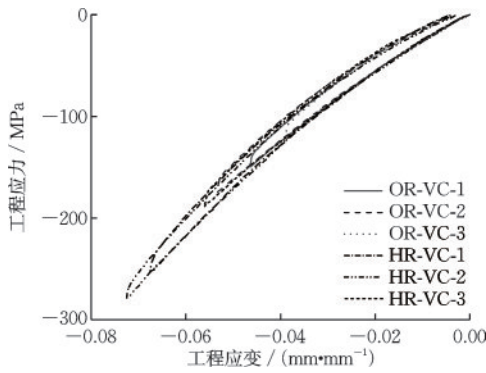


图5 体积压缩试验曲线

Fig.5 Volumetric compression test curves

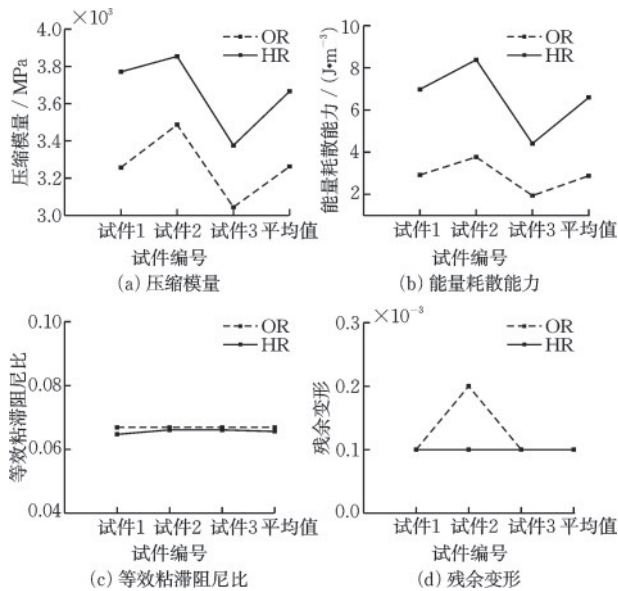


图6 压缩性能对比

Fig.6 Comparison of compression performance

缩弹性模量为 3 666.79 MPa,比一般的普通橡胶压缩模量高约 12.4%,高阻尼减振(震)橡胶在压缩条件下表现出与普通橡胶相差不大的耗能能力,主要是因为其在压缩时更倾向于储存能量而非耗散能量,高阻尼减振(震)橡胶的压缩残余

变形比一般的普通橡胶压缩残余变形小,高阻尼减振(震)橡胶的压缩变形时的具有较强的弹性恢复能力。

3.2 拉伸性能分析

3.2.1 滞回曲线形状规律分析

高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶各拉伸试验的应力与应变滞回曲线如图7和图8所示,两种橡胶材料的滞回曲线形状规律具有相似性,主要呈现以下特征:①如图7(a)和图8(a)位置①处所示,两种橡胶存在明显的 Mullins 效应(橡胶在循环拉伸时相同应变下的应力总是低于前一次拉伸的应力)在同一应变条件下的拉伸应力在初次循环中最大,且随着循环加载次数的增加逐渐下降,其下降幅度随着应变的变大而变大,橡胶在经历三次拉伸循环作用后拉伸性能趋于稳定;在位置②处所示,橡胶存在明显的瞬时残余变形,其随循环次数的增加而逐渐增大。②在单轴拉伸试验中,橡胶材料仅在一个方向上受到拉伸,应力状态比较单一,高阻尼减振(震)橡胶滞回曲线呈现较为饱满的“S”形,而普通橡胶的滞回曲线呈现较窄的“S”形。③在平面拉伸试验中,橡胶材料在两个方向上受到拉伸,材料内部的应力分布更复杂,高阻尼减振(震)橡胶在平面拉伸时滞回曲线更接近“S”形,而普通橡胶滞回曲线仍呈现较窄的“S”形。④在等双轴拉伸试验中,橡胶材料在所有方向上均匀拉伸,材料内部的应力分布最为均匀和复杂,高阻尼减振(震)橡胶的滞回曲线在这种情况下呈现出接近椭圆形的形状,而普通橡胶滞回曲线呈现接近“S”形状。高阻尼减振(震)橡胶的滞回曲线在各种变形模式下的滞回曲线较普通橡胶饱满,耗能性能优异。

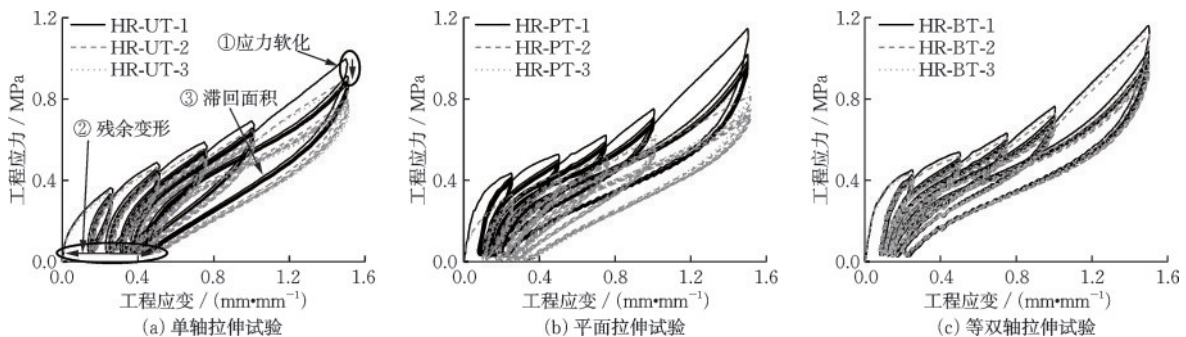


图7 高阻尼减振(震)橡胶试验曲线

Fig.7 Test curves of high-damping rubber for vibration (seismic) absorption

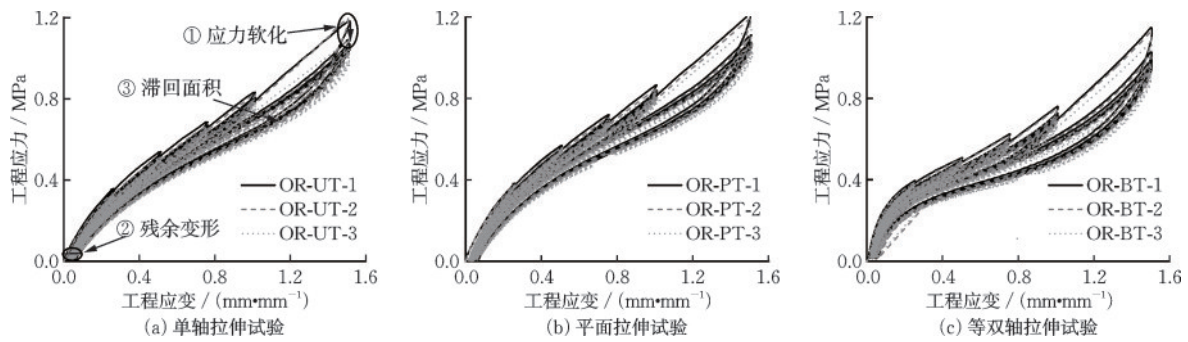


图8 普通橡胶试验曲线

Fig.8 Ordinary rubber test curves

3.2.2 力学性能分析

(1) 高阻尼减振(震)橡胶性能提升效果分析

橡胶经过两次循环加载后,橡胶材料的内部结构逐渐趋于稳定,分子链排列基本达到平衡状态。通常在第三圈时,材料的滞回曲线已经较为稳定,可以反映出橡胶的真实力学行为,故下述试验数据采用滞回曲线第三圈数据,并取三个样本试验的平均值,高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶0~150%应变范围内各指标如图9所示。

(I) 在单轴拉伸试验中,在25%、50%、75%、100%和150%应变时,高阻尼减振(震)橡胶的等效粘滞阻尼比为3.01%、2.95%、2.77%、2.72%、2.21%,残余变形为0.1201、0.1898、0.2409、0.2859、0.3424,拉伸刚度为1.5682、0.9921、0.8635、0.8424、0.8305 MPa。高阻尼减振(震)橡胶比普通橡胶的等效粘滞阻尼比和残余变形分别提升312.33%、391.67%、369.49%、342.93%、187.01%和471.90%、580.29%、625.60%、551.25%、516.94%,拉伸刚度降低4.82%、34.56%、39.10%、38.10%和62.36%。

(II) 在平面拉伸试验中,在25%、50%、75%、

100%和150%应变时,高阻尼减振(震)橡胶的等效粘滞阻尼比为5.03%、3.03%、2.41%、2.11%、2.06%,残余变形分别为0.2029、0.3188、0.3893、0.4648、0.4758,拉伸刚度为1.3391、0.8691、1.0467、1.0362、0.8471 MPa。高阻尼减振(震)橡胶比普通橡胶的等效粘滞阻尼比和残余变形分别提升608.45%、388.71%、295.08%、219.70%、142.35%和919.60%、952.15%、993.54%、867.06%、694.32%,拉伸刚度降低32.11%、51.04%、34.23%、25.90%和67.25%。

(III) 在等双轴拉伸试验中,在25%、50%、75%、100%和150%应变时,高阻尼减振(震)橡胶的等效粘滞阻尼比为4.75%、2.66%、2.44%、1.78%、1.93%,残余变形分别为0.0922、0.1295、0.1674、0.2260、0.3527,拉伸刚度分别为1.9900、1.0188、0.9209、0.8758、0.7880 MPa。高阻尼减振(震)橡胶比普通橡胶的等效粘滞阻尼比和残余变形分别提升508.97%、254.67%、205.00%、97.78%、63.73%和365.66%、439.58%、504.33%、536.71%、576.97%,拉伸刚度降低63.75%、79.95%、81.48%、80.89%和77.26%。

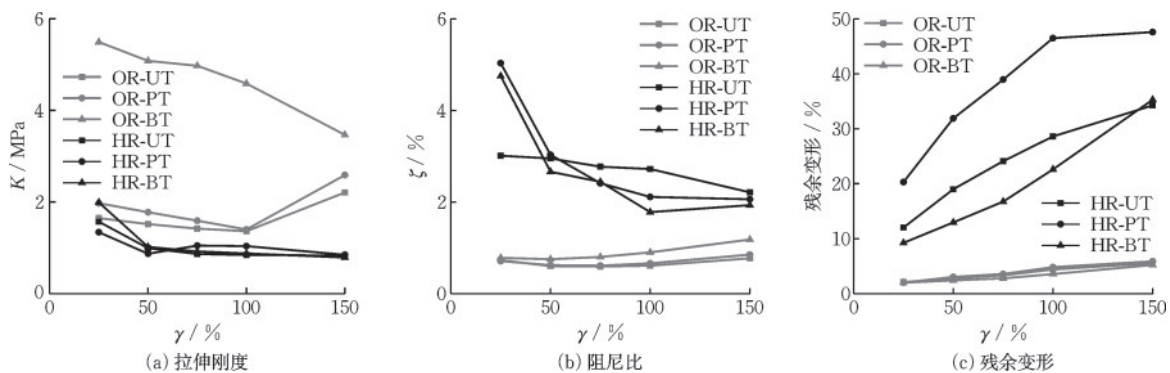


图9 高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶指标变化

Fig.9 Changes in indicators of high-damping rubber for vibration (seismic) absorption and ordinary rubber

单轴、平面和等双轴拉伸试验研究表明,所设计的新型高阻尼减振(震)橡胶较普通橡胶具备更高的等效粘滞阻尼比、残余变形和更低的拉伸刚度,意味着该材料更适用于需要高能量耗散和更大变形吸收能力的工程应用,此特性使得此新型高阻尼减振(震)橡胶在一些特定领域比普通橡胶更具有优势,如在减隔振(震)装置中使用。

(2) 高阻尼减振(震)橡胶在各变形条件下的加载次数与幅值相关性

因单轴拉伸试验、平面拉伸滞回曲线规律与等双轴拉伸试验滞回曲线规律一致,故示例性分析等双轴拉伸试验滞回曲线,如图10所示。在高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶的0~150%应变范围内,可知:

高阻尼减振(震)橡胶的拉伸刚度随着加载次数的增加呈现先增加后减小的趋势,高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶的25%应变下的拉伸刚度分别稳定在1 MPa和5.4 MPa;高阻尼减振(震)橡胶拉伸刚度随着加载幅值的增加而逐渐减小。高阻尼减振(震)橡胶设计用于能量吸收,其拉伸刚度较低,普通橡胶的初期刚度增加可能是由于应变硬化和Mullins效应减弱,随后由于疲劳和损伤积累刚度下降,最终趋于平缓。

在25%、50%、75%、100%和150%应变下,高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶的等效粘滞阻尼比

分别为4.75%、2.66%、2.44%、1.78%、2.08%和0.78%、0.75%、0.8%、0.9%、1.18%,等效粘滞阻尼比分别提升6.06、3.53、3.04、1.97和1.77倍,耗能能力提升明显。

高阻尼减振(震)橡胶的等效粘滞阻尼比随着加载次数的增加呈现先减小后增加,最后再减小的趋势,普通橡胶的等效粘滞阻尼比随着加载次数的增加而逐渐减小,最后趋于稳定,普通橡胶可能是因为疲劳和损伤积累使能量损耗减少,而高阻尼减振(震)橡胶由于其内部结构调整和能量损耗特性的复杂变化导致其呈现先减小后增加再减小的趋势;普通橡胶的等效粘滞阻尼比随着应变的增加而逐渐增加,高阻尼减振(震)橡胶的等效粘滞阻尼比随着应变的增加而逐渐减小,普通橡胶的等效粘滞阻尼比随着应变增加逐渐增加,这是由于分子链滑移和内部摩擦增加,导致能量损耗增大,而高阻尼减振(震)橡胶的等效粘滞阻尼比随着应变增加逐渐减小,因为其在低应变范围内吸收更多能量,初期阻尼比较高,但随着应变增加,分子链和内部结构趋于稳定,摩擦和滑移减少,能量损耗减小。

由于橡胶材料本身的内部损伤积累和应变硬化效应,高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶的残余变形随着加载次数和加载幅值的增加而增加,高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶的25%应变下残余变形

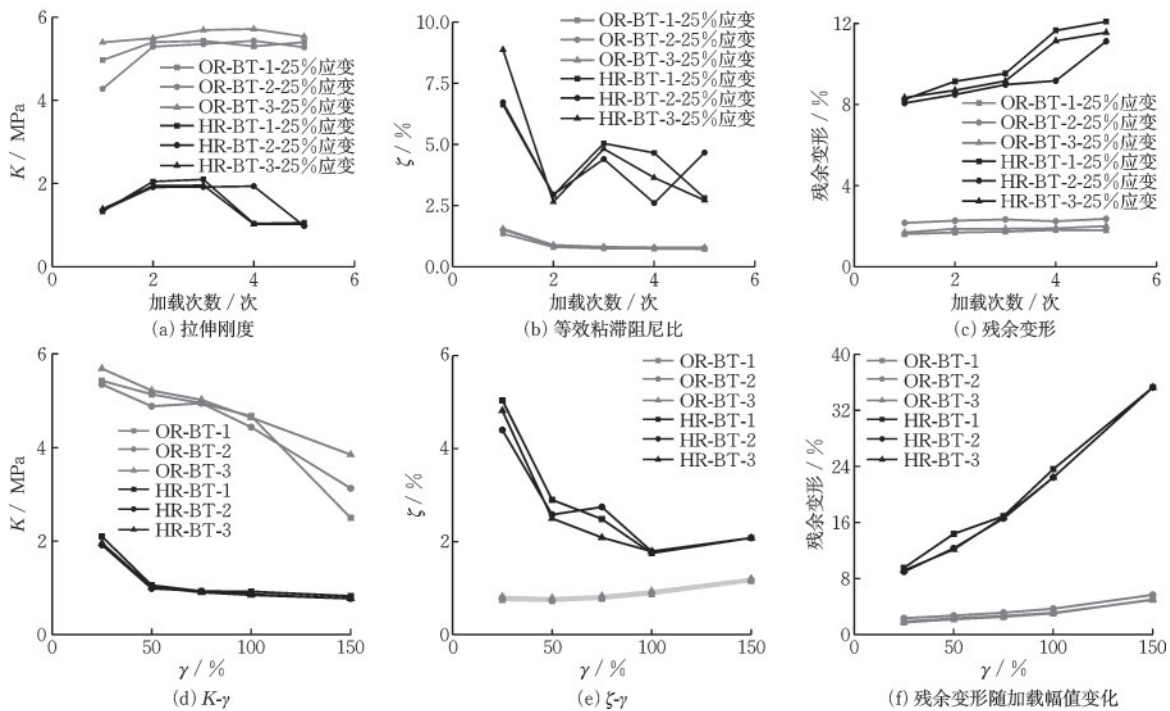


图10 加载次数与幅值相关性

Fig.10 Correlation between number of loading cycles and amplitude

稳定在 11.59% 和 2.05%，普通橡胶在低至中等应变范围内具有较好的恢复能力，但仍存在一定的永久变形，高阻尼减振(震)橡胶由于设计用于吸收更多能量，内部结构在拉伸变形后较难完全恢复，导致其在较低应变下也表现出较高的永久变形。这些现象表明，高阻尼减振(震)橡胶材料在多次和高幅值加载条件下，其刚度、阻尼比和残余变形表现出复杂的变化，但是都随着变形模式和幅值的变化而均匀变化，反映了其内部结构和力学行为的稳定性。

4 数据拟合

描述橡胶弹性力学行为的理论模型一般来说可以分成两大类：基于统计热力学的动力学理论和认为弹性体是连续介质的唯象学方法。而在研究橡胶材料时，一般认为它是各向同性不可压缩的超弹性体，其物理属性可通过应变能函数表达^[24]，而相关学者也对于不同本构模型对橡胶制品的有限元法适应性进行了相关研究^[25]，在橡胶的超弹性本构模型中，适用于有限元分析的模型有 Mooney-Rivlin 模型、Ogden $N=3$ 模型、Neo-Hooke 模型和 Yeoh 模型等，其中 Mooney-Rivlin 本构模型的应变能密度函数为：

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (1)$$

式中， W 为应变能函数，其为变形张量 I_1, I_2 的函数； C_{10}, C_{01} 为材料常数； D_1 为决定材料是否可压缩参数； J 为橡胶变形后与变形前的体积比。如果采用两参数的模型且将材料视为不可压缩，则式(1)可简化成：

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

Mooney-Rivlin 模型能很好地描述橡胶材料在 150% 以内的变形，而 Ogden 本构模型的应变能密

度函数为：

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (3)$$

式中， W 为应变能函数； α_i, μ_i 为材料常数； $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为 3 个主伸长比； N 为多项式的阶数，可以取 1~6。

研究表明，随着多项式阶数 N 的增加，模型的分析精度会提高^[26]，但同时随着阶数的增加，误差累积使有限元计算收敛困难，一般认为 4 阶以上的应变能函数无太多的实用价值，工程上常用 3 阶的 Ogden 本构模型，且根据相关学者研究表明^[15, 27-28]，炭黑填充橡胶材料在 3 项基础试验齐全的情况下，优选 Ogden 模型(阶数 $N=3$)。

数据拟合采用采用高性能分析软件 ABAQUS 进行分析，能够驾驭庞大复杂的问题和模拟高度非线性问题，涵盖了材料、几何和状态非线性等多个方面，且计算收敛速度较快。本文采用三次试验数据中的平均值，对内置本构模型进行拟合，拟合结果见表 3、表 4。运用超弹性本构 Mooney-Rivlin 模型和 Ogden $N=3$ 模型进行高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶材料的体积压缩、单轴、等双轴和平面拉伸行为拟合，曲线拟合效果好，两种本构能很好的模拟高阻尼减振(震)橡胶的非线性行为。

表 3 Mooney-Rivlin 本构拟合结果

Table 3 Fitting results of Mooney-Rivlin constitutive model

		Mooney-Rivlin		Mullins effect 参数	
高阻尼 减振(震) 橡胶	C10	0.181 281 3	r	2.092 40	
	C01	9.788 206 3E-04	m	0.105 81	
	D1	1.435 067 4E-05	beta	0.499 70	
普通橡胶	C10	0.228 765 67	r	2.092 40	
	C01	1.608 975 4E-02	m	0.105 81	
	D1	1.506 053 3E-05	beta	0.499 70	

表 4 Ogden $N=3$ 本构拟合结果

Table 4 Fitting results of Ogden $N=3$ constitutive model

		Ogden $N=3$			Mullins effect 参数	
高阻尼减振(震) 橡胶	mu1	2.053 129 3	-1.656 481 8	3.300 493 2E-08	r	2.577 20
	alpha1	2.538 459 5	2.700 337 1	-9.909 947 5	m	0.188 93
	D1	1.858 152 1E-05	8.481 327 4E-08	-8.272 707 2E-10	beta	0.137 25
普通橡胶	mu1	0.533 003 7	1.813 462 4E-04	3.346 417 1E-03	r	2.577 20
	alpha1	1.231 174 5	10.672 048 1	-3.412 129 2	m	0.188 93
	D1	1.850 100 0E-05	5.350 011 0E-08	-2.311 404 4E-10	beta	0.137 25

5 结 论

通过对新型高阻尼减振(震)橡胶和普通橡胶开展材料力学性能试验与分析,并对试验结果进行数据拟合,研究结果表明:

(1) 在体积压缩试验中,高阻尼减振(震)橡胶的平均压缩弹性模量比一般的普通橡胶压缩模量高约12.4%,其具有较低的残余变形。

(2) 在单一方向变形的单轴拉伸试验中,高阻尼减振(震)橡胶在150%变形以内比普通橡胶等效粘滞阻尼比和残余变形分别提升187.01%~391.67%和471.90%~625.60%,拉伸刚度降低4.82%~62.36%,高阻尼减振(震)橡胶在单一受力状态下比普通橡胶具有更高的等效粘滞阻尼比和残余变形,更低的拉伸刚度。

(3) 在两个方向变形的平面和等双轴拉伸试验中,高阻尼减振(震)橡胶在150%变形以内比普通橡胶等效粘滞阻尼比和残余变形分别提升63.73%~608.45%和365.66%~919.60%,拉伸刚度降低25.90%~81.48%,高阻尼减振(震)橡胶在双向复杂受力状态下具有更高的等效粘滞阻尼比和残余变形,更低的拉伸刚度,其具有的稳定非线性弹性和增强的耗能特性,符合开发预期。

(4) 通过试验数据拟合得到能很好的模拟此高阻尼减振(震)橡胶非线性弹性行为的Mooney-Rivlin与Ogden $N=3$ 模型参数,为此高阻尼减振(震)橡胶后续进行参数分析及推广应用提供了理论依据。未来的研究重点建议继续围绕高阻尼减振(震)橡胶材料的力学性能展开,重点探讨其在复杂应力状态下的行为和长期服役性能,同时将结合工程实际需求开发适用于不同应用场景的高阻尼减振(震)橡胶材料,为土木工程结构和设备的减振(震)与隔振(震)提供更加可靠和高效的解决方案。

参考文献:

[1] 廖益蓝,杨启,陆凯雷,等.橡胶材料在电抗器中的隔振性能研究[J].电工材料,2022(5):40-44.
Liao Y L, Yang Q, Lu K L, et al. Study on vibration isolation performance of rubber material in reactor[J]. Electrical Engineering Materials, 2022(5): 40-44. (in Chinese)

[2] 胡钟玮,徐赵东,管庆松,等.新型多维隔减震装置

在高烈度区工程中的应用[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(3):425-432.

Hu Z W, Xu Z D, Guan Q S, et al. Application of novel multi-dimensional earthquake isolation and mitigation device for practical engineering in high intensity region [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 425-432. (in Chinese)

- [3] 张启宵,贺占蜀,邵丽娜.橡胶材料力学性能试验方法研究[J].汽车电器,2019(5):62-64.
Zhang Q X, He Z S, Shao L N. Study on test method of mechanical properties of rubber material[J]. Auto Electric Parts, 2019(5): 62-64. (in Chinese)
- [4] Woo C S, Park H S. Evaluation of mechanical properties of natural and synthetic rubber material [C]//Mechanical and Materials Engineering of Modern Structure and Component Design. Berlin: Springer, 2015: 25-35.
- [5] Markovicová L, Zatkalíková V, Sovík J, et al. Verification of the probability of elastomers degradation in natural environments[J]. Production Engineering Archives, 2022, 28(3): 279-282.
- [6] 薛斌,卢文胜,任祥香,等.厚层铅芯橡胶支座竖向性能敏感性及其不确定性[J].防灾减灾工程学报,2023,43(3):453-462.
Xue B, Lu W S, Ren X X, et al. Sensitivity and uncertainty on vertical performance of thick lead-rubber bearings [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(3): 453-462. (in Chinese)
- [7] 徐超.粘弹性阻尼器微振减振机理及试验研究[D].南京:东南大学,2018.
Xu C. Micro-vibration damping mechanism and experimental study on the viscoelastic damper [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [8] Findik F, Yilmaz R, Köksal T. Investigation of mechanical and physical properties of several industrial rubbers[J]. Materials & Design, 2004, 25(4): 269-276.
- [9] Lu C Z, Li J Y, Zhou B Y, et al. Experimental investigation of stiffness characteristics and damping properties of a metallic rubber material[J]. Mechanics of Composite Materials, 2017, 53(4): 541-550.
- [10] 徐业守.粘弹性阻尼器微观减震机理、试验与减震结构研究[D].南京:东南大学,2020.
Xu Y S. Micro-scale damping mechanism experiments, and earthquake mitigation structure researches of the viscoelastic damper [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [11] 张俊涛,戚颖楠,杨友志,等.橡胶改性碳纤维-多壁碳纳米管水泥复合材料性能试验与分析[J].水资源与水工程学报,2023,34(6):130-138.

- Zhang J T, Qi Y N, Yang Y Z, et al. Performance experimental analysis of rubber-modified cement composite reinforced by carbon fiber and multiwalled carbon nanotubes[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(6): 130-138. (in Chinese)
- [12] Xu Z H, Zhang Y B, Li A L, et al. Research progress on compounding agent and mechanical test method of fluororubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(36): 50913.
- [13] 巫锐泽. NR/NBR 高阻尼橡胶支座的制备与性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
Wu R Z. Preparation and performance of NR/NBR high damping rubber bearings[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (in Chinese)
- [14] 张永旺. 新型高阻尼隔震橡胶支座的研发与性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
Zhang Y W. Development and performance study of new type of high damping rubber bearing[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [15] 胡小玲, 刘秀, 李明, 等. 炭黑填充橡胶超弹性本构模型的选取策略[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 34-42, 48.
Hu X L, Liu X, Li M, et al. Selection strategies of hyperelastic constitutive models for carbon black filled rubber[J]. Engineering Mechanics 2014, 31(5): 34-42, 48. (in Chinese)
- [16] 杜海洋. 隔震支座橡胶材料力学性能试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
Du H Y. Experimental study on mechanical properties of rubber materials used for isolation bearings[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [17] 刘晓东, 张玉磊, 郭为君. 硅橡胶减震器振动试验的有限元模拟[J]. 噪声与振动控制, 2010, 30(5): 173-176.
Liu X D, Zhang Y L, Guo W J. Finite element simulation of vibration test of silicon rubber absorbers[J]. Noise and Vibration Control, 2010, 30(5): 173-176. (in Chinese)
- [18] 李悦, 高崇铭, 李冲, 等. 海蚀环境下考虑摩擦滑移的桥梁板式橡胶支座老化剪切性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(2): 340-346.
Li Y, Gao C M, Li C, et al. Research on the aging shear performance of plate rubber bearings in bridges considering frictional slip in marine corrosion environment [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 340-346. (in Chinese)
- [19] 周娴, 潘文, 王道航, 等. 芳纶网橡胶复合粘弹阻尼器性能研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(1): 118-124, 132.
- Zhou X, Pan W, Wang D H, et al. Research on properties of aramid mesh and rubber composite viscoelastic damper [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(1): 118-124, 132. (in Chinese)
- [20] 卢震, 陈开圣. 橡胶黏土混合土动剪切模量及阻尼比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(2): 250-257.
Lu Z, Chen K S. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of rubber clay mixture [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(2): 250-257. (in Chinese)
- [21] 塑料拉伸性能的测定 第2部分: 模塑和挤塑塑料的试验条件: GB/T 1040.2—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [22] 橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序: GB/T 2941—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [23] 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.
- [24] 李晓芳, 杨晓翔. 橡胶材料的超弹性本构模型[J]. 弹性体, 2005(1): 50-58.
Li X F, Yang X X. A review of elastic constitutive model for rubber materials[J]. China Elastomers, 2005(1): 50-58. (in Chinese)
- [25] 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 G Q, Liu M, Yao Y C, et al. Application of different constitutive models in the nonlinear finite element method for rubber parts[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(4): 40-47. (in Chinese)
- [26] Ogden R W. Nearly isochoric elastic deformations: Application to rubberlike solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1978, 26(1): 37-57.
- [27] 钱胜, 陆益民, 杨咸启, 等. 橡胶材料超弹性本构模型选取及参数确定概述[J]. 橡胶科技, 2018, 16(5): 5-10.
Qian S, Lu Y M, Yang X Q, et al. Overview of selection and parameter determination for hyperelastic constitutive model of rubber material[J]. Rubber Science and Technology, 2018, 16(5): 5-10. (in Chinese)
- [28] Li M, Hu X, Luo W B, et al. Comparison of two hyperelastic models for carbon black filled rubber[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 275-277: 28-32.

(本文编辑: 赵霞)