

金属橡胶支座本构模型研究

张颖周

(甘肃恒石公路检测科技有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 基于金属橡胶支座的压缩试验结果,系统开展了其力学特性的研究。通过试验数据分析,明确了切线模量与应力之间的显著线性关系;进而采用解析积分方法,构建了以指数函数形式表征的压缩本构模型。结果表明:该支座的切线模量随应力增长呈现良好的线性变化趋势;所提出的指数型本构模型能准确刻画其非线性应力-应变响应,且与试验数据高度吻合。研究结果不仅为金属橡胶支座的精细化力学建模提供了理论支撑与方法依据,亦对其结构优化设计及工程应用具有重要指导价值;同时,为相关数值模拟分析奠定了坚实的理论与方法学基础。

关键词: 支座;金属橡胶;切线模量;本构模型;非线性材料

中图分类号: U441;U443

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0104-04

Study on Constitutive Model of Metal Rubber Bearing

ZHANG Yingzhou

(Gansu Hengshi Highway Detection Technology Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the compression test results of metal rubber bearings, a systematic study of its mechanical properties is carried out. Through experimental data analysis, a significant linear relationship between tangent modulus and stress is identified. Furthermore, the analytical integration method is used to build a compression constitutive model represented in the form of an exponential function. The results indicate that the tangent modulus of the bearing presents a good linear variation trend with increasing stress. The proposed exponential constitutive model can accurately depict its nonlinear stress-strain response and closely aligns with experimental data. The research result not only provides theoretical support and methodological basis for the refined mechanical modeling of metal rubber bearing, but also has the significant guiding value for its structural optimization design and engineering applications. Simultaneously, a solid theoretical and methodological foundations are laid for related numerical simulation analysis.

Keywords: bearing; metal rubber; tangent modulus; constitutive model; nonlinear material

0 引言

公路桥梁常用的橡胶类支座主要包括板式橡胶支座和高阻尼橡胶支座,铅芯橡胶支座也有部分应用,但橡胶材料的老化问题普遍影响着该类支座的耐久性。具体而言,板式橡胶支座在温度、臭氧侵蚀及蠕变效应等因素作用下,易出现刚度降低问题^[1];铅芯橡胶支座中的橡胶在低温环境下会发生硬化现象,同时因长期承受温度和交通荷载(低周疲劳)作用而易致其疲劳剪切破坏^[2];高阻尼橡胶支座虽通过表面覆层三元乙丙橡胶改善了性能,但并未完全解决橡胶类材料的老化问题。为解决这一共性难题,张颖周^[3]提出采用金属橡胶材料来制备桥梁支

座的方案,并通过相关试验验证了其可行性。金属橡胶支座因采用金属丝压制而成,因此即有金属的耐高低温、耐老化等性能,又具备橡胶材料的弹性;同时其阻尼性能也较为优越,因而该支座已成为航空航天精密减振、军事装备抗冲击防护及极端工况器件开发的关键材料。目前我国金属橡胶应用领域已从传统的减振降噪拓展至电磁屏蔽、热管理及生物医学等新兴方向^[4]。

金属橡胶是通过金属丝缠绕成卷、定距拉伸、按特定规则编织并在模具中冲压成型,具有类似橡胶超弹性属性的多孔金属材料。作为一种典型非线性材料,国内外学者对其本构关系开展了系统性研究,主要集中于2类模型。一是多项式函数模型,该模型通过多项式函数组合来描述金属橡胶的应力-应变关系,相关研究包括陈艳秋等^[5]提出的小曲梁模型,该模型基于金属橡胶微元体的小曲梁串并联关

收稿日期: 2026-03-11

作者简介: 张颖周(1989—),男,硕士,工程师,从事公路与桥梁工程检测工作。

系推导出总体刚度,经试验修正后完善为三次多项式本构方程;李宇燕等^[6]提出的多孔材料理论模型,该模型基于多孔介质力学理论,建立了考虑孔隙结构的金属橡胶本构关系,亦采用多项式形式表达;余慧杰等^[7]提出的螺旋弹簧理论模型,该模型将金属橡胶微元简化为螺旋弹簧模型,并结合试验数据将金属橡胶的本构关系修正为三次多项式形式。此类模型形式简洁,但存在以下局限:多项式系数物理意义不明确,难以与材料微观结构参数直接关联,不利于后续多场耦合分析和性能优化设计。二是悬臂梁模型,该模型通过悬臂曲梁结构来模拟金属橡胶的细观变形机制,代表性研究包括文献[8]~[10],其核心思想为:将金属橡胶内部螺旋卷结构等效为悬臂曲梁阵列,通过力学解析建立本构模型,可反映材料的非线性刚度特性和滞回行为,为揭示其能量耗散机理提供了理论依据。

上述学者通过微观单元力学推导方法,建立了金属橡胶试件的力学模型,为揭示其本构关系奠定了重要理论基础。金属橡胶材料因兼具显著的非线性力学特征与工艺诱导的各向异性,其力学行为受应力路径、加载历史及材料组分等多重因素影响,呈现高度复杂性^[11]。针对此类材料特性,基于试验数据驱动的力学反分析方法应运而生——该方法以力学理论为框架,结合试验观测的物理量,通过逆向求解来获取材料本构参数,可实现理论与实践的深度融合,兼具学术研究价值和工程应用前景。

文献[3]、[12]、[13]针对金属橡胶支座的力学性能开展了试验研究,但对其竖向压缩本构关系的理论建模关注较少。为此,本文基于宏观力学视角,采用积分推导方法构建金属橡胶支座的竖向压缩本构模型,系统揭示其非线性应力-应变关系。所得研究成果可为金属橡胶支座的精细化有限元模拟提供理论支撑,同时可为工程应用中该类支座的力学性能预测和设计优化提供关键参考。

1 金属橡胶支座压缩试验

通过金属橡胶支座的压缩试验来获取支座的力-位移关系曲线,并计算出金属橡胶支座的应力-应变关系曲线,为金属橡胶支座本构模型研究获取原始试验数据。

1.1 金属橡胶支座力学性能参数

本文对3组(A、B、C)共7个金属橡胶支座进行压缩试验。金属橡胶支座及其局部示意图见图1。

采用304奥氏体不锈钢丝为母材,丝径0.5 mm,弹簧卷直径5 mm,其他参数见表1。影响金属橡胶支座力学性能的主要参数有相对密度、形状系数和模量等。

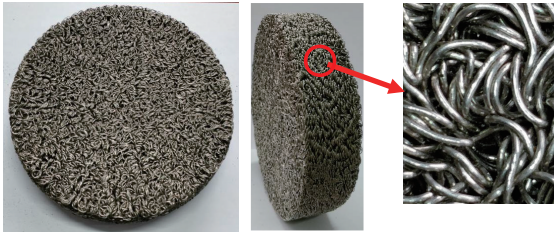


图1 金属橡胶支座及其局部示意图

表1 金属橡胶支座参数

支座编号	尺寸/mm	相对密度	形状系数
A1	d165×41	0.385	4.02
A2	d163×41	0.341	3.98
A3	d160×43	0.295	3.72
B1	d101×35	0.301	2.89
B2	d103×41	0.242	2.51
B3	d101×41	0.203	2.46
C1	d59×39	0.312	1.51

1.1.1 支座形状系数

参考板式橡胶支座形状系数定义^[14],金属橡胶支座形状系数S的定义式为:

$$S=d/h$$
 (1)

式中:d为金属橡胶支座直径;h为金属橡胶支座厚度。

1.1.2 支座相对密度

支座相对密度用下式计算:

$$\bar{\rho}=\rho/\rho_s$$
 (2)

式中: $\bar{\rho}$ 、 ρ_s 、 ρ 分别为支座相对密度、金属丝密度和支座本体密度。

1.1.3 切线模量

金属橡胶是一种成型上各向异性的材料,又具有高度的非线性特征,其弹性模量并不像线弹性材料一样是一个常数,因此可以采用切线模量对其进行力学性能研究。金属橡胶支座切线模量 E_t 的计算式^[15]为:

$$E_t=\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$
 (3)

式中:d σ 为支座应力增量;d ε 为支座应变增量。

1.2 试验结果及其分析

基于500 kN电子万能试验机,以2 mm/min速率对金属橡胶支座进行竖向压缩试验,并通过力/位移传感器同步采集竖向载荷和变形数据。通过试验得到的力-位移曲线,可计算得到金属橡胶支座的应

力-应变关系曲线(见图2至图4)。

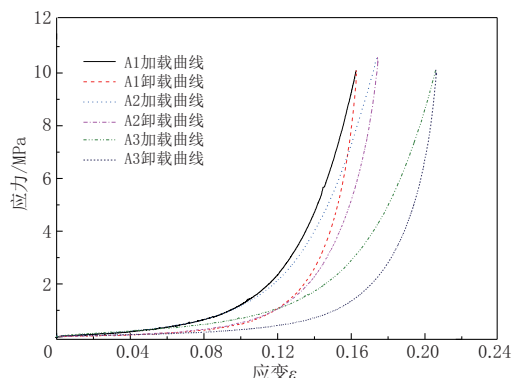


图2 A组支座试验结果

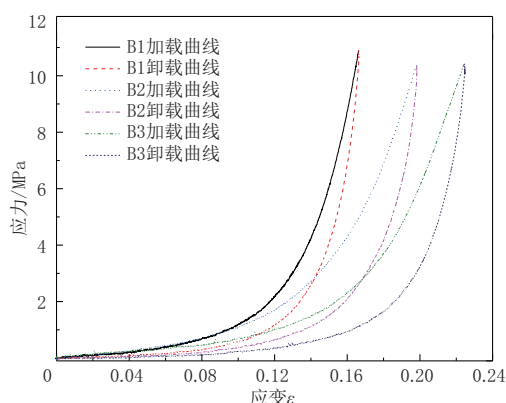


图3 B组支座试验结果

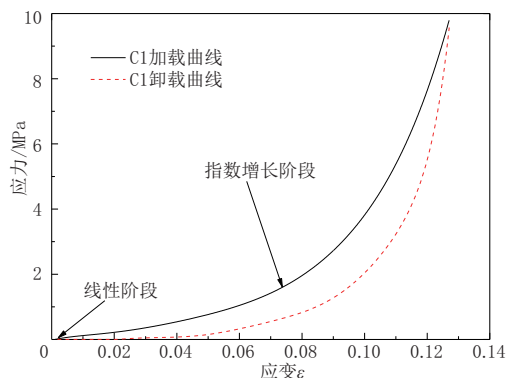


图4 C1支座试验结果

金属橡胶支座的压缩性能包括加载曲线和卸载曲线两部分。由图2至图4可知,其中每条曲线都可以分为微小的线性阶段和指数增长阶段。在线性阶段,金属橡胶支座仅发生微小的变形,因此对支座力学性能影响较小。在指数增长阶段前期,在较小应力下,金属橡胶就会发生较大的应变,这是因为金属橡胶在空间上可以看作是多孔材料,在加载初期其内部空隙较大,相对密度较小,仅依靠金属丝间的勾连作用传递荷载;随着应变增加,金属橡胶支座内部的孔隙逐渐减小,相对密度变大,金属丝间的摩阻力由相互勾连的滑动摩擦逐渐转变为挤压滑动摩擦,因此金属橡胶支座的应力会随着支座应变的增大而

逐渐增大。金属橡胶支座的加载与卸载曲线不重合,原因是金属橡胶内部金属丝的勾连滑动作用所产生的摩擦耗能会使金属橡胶支座在宏观上表现出显著的阻尼特性。

2 金属橡胶支座切线模量分析

金属橡胶是一种非线性材料,采用切线模量来研究其力学特性具有广泛的应用性。由图2至图4可以看出,金属橡胶支座的应力-应变关系曲线连续、光滑、无尖点,因此其满足函数的可导性。由目前研究成果可知,金属橡胶支座的本构关系可以采用多项式之和的形式来表示。本文以MATLAB为平台,基于最小二乘法,采用六次多项式拟合后得到的公式进行计算,所得结果与试验结果吻合较好。但是多项式之和的函数形式未知参量多,且每个未知系数的物理意义难以明确。因此,对拟合后的函数求1阶导数,从而得到金属橡胶支座的切线模量-应变关系曲线和切线模量-应力关系曲线。图5是金属橡胶支座的切线模量-应变关系曲线,可以看出,该曲线与其应力-应变关系一样也表现出明显的非线性特征。非线性材料的力学性能与其应力史相关,故经坐标变换作出金属橡胶支座(C1)的切线模量-应力变化曲线,见图6。

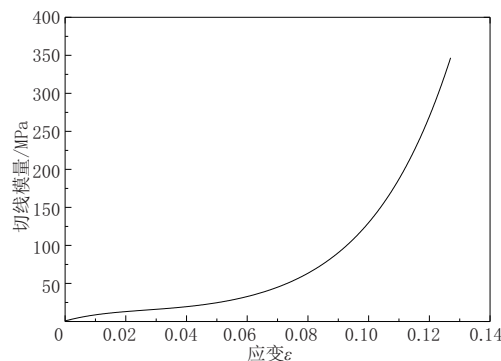


图5 支座切线模量与应变关系

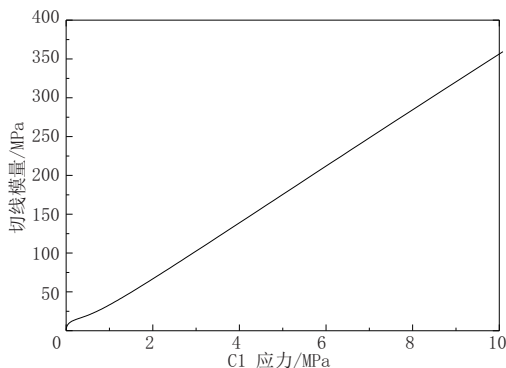


图6 C1支座切线模量与应力关系

由图 6 可知,金属橡胶支座的切线模量-应力近似为线性关系,因此可以得到支座切线模量 E_t 与应力 σ 的关系式:

$$E_t = E_0 + a\sigma \tag{4}$$

式中: E_0 为支座切线模量初始值(主要由金属橡胶支座线性阶段力学性能决定); a 为支座切线模量因子。

3 金属橡胶支座本构模型

由前面分析可知,切线模量是应力-应变的导函数,因此各个应力下支座的竖向应变 ε_i 为:

$$\varepsilon_i = \int_0^{\sigma_i} \frac{1}{E_t} d\sigma \tag{5}$$

式中: σ_i 为对应支座的应力; $d\sigma$ 为支座的应力增量。

将式(4)代入式(5),则任意一点的应变为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \int_0^{\sigma_i} \frac{1}{a\sigma + E_0} d\sigma = \frac{1}{E_0} \int_0^{\sigma_i} \frac{1}{\frac{a\sigma}{E_0} + 1} d\sigma = \\ &= \frac{1}{a} \int_0^{\sigma_i} \frac{1}{\frac{a\sigma}{E_0} + 1} d(\frac{a\sigma}{E_0} + 1) = \frac{1}{a} (\ln(\frac{a\sigma}{E_0} + 1))|_0^{\sigma_i} = \end{aligned} \tag{6}$$

$$\frac{1}{a} (\ln(\frac{a\sigma_i}{E_0} + 1))$$

由式(6)可得到式(7)和式(8):

$$e^{a\varepsilon_i} = \frac{a}{E_0} \sigma_i + 1 \tag{7}$$

$$\sigma_i = \frac{E_0}{a} (e^{a\varepsilon_i} - 1) \tag{8}$$

由式(8)可以看出,金属橡胶支座的本构模型符合指数函数形式,这也与试验结果曲线相符。

金属橡胶支座指数模型系数见表 3;指数模型识别结果与试验结果对比见图 7。

表 3 金属橡胶支座指数模型系数

系数	加载曲线	卸载曲线
a	$1.257\ 87\times10^{-1}$	$2.463\ 44\times10^{-3}$
E_0	2.809 716 8	0.102 913 41

由图 7 可知,本文推导的指数模型可以准确地表示金属橡胶支座加载曲线的应力-应变关系;在误差允许范围内,也可以表示卸载曲线的应力-应变关系。

4 结 语

(1)金属橡胶支座的切线模量-应变关系与其应力-应变关系同样呈现高度非线性特征,而切线模量与应力呈现良好的线性函数关系。

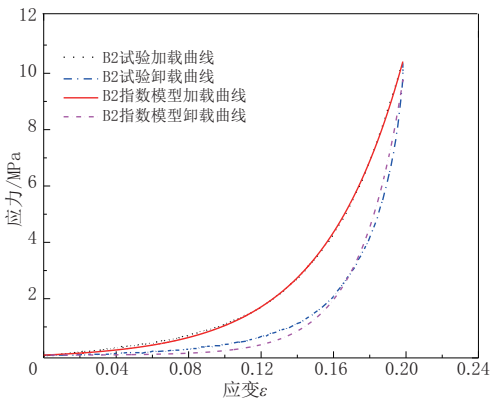


图 7 B2 支座指数模型识别结果与试验结果对比

(2)基于切线模量理论推导的指数模型能够有效表征金属橡胶支座的力学行为,特别是在加载曲线的描述上具有较高精度;同时在合理误差范围内也能近似表示卸载曲线。这一模型为金属橡胶支座在工程领域的应用提供了重要的理论支持。

参考文献:

[1] 石岩,王东升,陈宝魁,等.时效及环境因素对隔震连续梁桥地震反应的影响[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(4):827-839.

[2] 庄军生.桥梁支座[M].4版北京:中国铁道出版社,2015.

[3] 张颖周.新型桥梁支座力学性能试验研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.

[4] 张中平,董秀萍,黄明吉.金属橡胶研究进展与展望[J].材料导报,2026,40(3):183-194.

[5] 陈艳秋,郭宝亭,朱梓根.金属橡胶减振垫刚度特性及本构关系研究[J].航空动力学报,2002(4):416-420.

[6] 李宇燕,黄协清.密度变化时金属橡胶材料的非线性本构关系[J].航空材料学报,2008(2):70-75.

[7] 余慧杰,刘文慧,王亚苏.金属橡胶静刚度特性及其力学模型研究[J].中国机械工程,2016,27(23):3167-3171.

[8] 曹凤利,白鸿柏,任国全,等.基于变长度悬臂曲梁的金属橡胶材料本构模型[J].机械工程学报,2012,48(24):61-66.

[9] CAO Fengli, BAI Hongbai, LI Dongwei, et al. A constitutive model of metal rubber for hysteresis characteristics based on a meso-mechanical method[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(1): 1-6.

[10] 曹凤利,白鸿柏,任国全,等.金属橡胶恢复力的迟滞模型研究[J].中国机械工程,2014,25(3):311-314;320.

[11] 杨成祥.材料非线性模型的进化识别方法研究[D].沈阳:东北大学,2001.

[12] 夏修身,张颖周,陈兴冲,等.金属橡胶支座力学性能试验[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(4):92-99.

[13] 夏修身,张颖周.金属橡胶支座压缩性能试验研究[J].应用基础与工程科学学报,2021,29(4):952-960.

[14] JT/T4—2004 公路桥梁板式橡胶支座[S].

[15] 张志平.广义切线模量理论及其应用[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2005.