

# 基于 SHPB 的船用橡胶减振器冲击动力学特性研究

韦子祥<sup>1</sup>, 邱中辉<sup>2,3</sup>, 陈凯杰<sup>1</sup>, 陈蔚芳<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国船舶集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078;  
3. 船舶与海洋工程特种装备和动力系统国家工程研究中心-船舶及海洋工程燃气轮机研发与检测实验室, 黑龙江 哈尔滨 150078)

**摘要:**为研究橡胶减振器的冲击力学特性, 基于超-粘弹性本构理论建立了应变率相关的橡胶材料冲击本构模型, 在霍普金森压杆(SHPB)装置上开展了速度范围为3~12 m/s的8组冲击试验, 获得了应变率范围为1 500~6 000/s的应力-应变关系, 建立了3阶冲击应变率修正模型。以某型船用动力设备橡胶减振器为研究对象, 在ABAQUS软件中开展了减振器跌落冲击仿真分析, 并进行了试验验证, 研究了减振器跌落高度与结构参数对橡胶减振器冲击特性的影响。结果表明:橡胶减振器仿真冲击刚度与试验冲击刚度的误差为16.49%, 处于工程应用可接受范围内, 说明采用应变率修正的冲击本构模型能够合理表征橡胶的冲击力学特性;冲击刚度与减振器跌落高度及橡胶倾角和中径长呈单调递增, 与橡胶厚度呈单调递减, 其中倾角对刚度的影响最大。

**关键词:** SHPB; 丁腈橡胶; 本构模型; 冲击刚度; 应变率

中图分类号: TQ332; TQ333.7 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.04.018

[引用本文格式] 韦子祥, 邱中辉, 陈凯杰, 等. 基于 SHPB 的船用橡胶减振器冲击动力学特性研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(4): 139-147. WEI Zi-xiang, QIU Zhong-hui, CHEN Kai-jie, et al. Research on impact mechanical characteristics of ship rubber shock absorber based on SHPB[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(4): 139-147.

## Research on Impact Mechanical Characteristics of Ship Rubber Shock Absorber based on SHPB

WEI Zi-xiang<sup>1</sup>, QIU Zhong-hui<sup>2,3</sup>, CHEN Kai-jie<sup>1</sup>, CHEN Wei-fang<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016; 2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078;  
3. Ship and Marine Engineering Special Equipment and Power System National Engineering Research Center-Ship and Ocean Engineering Gas Turbine R&D and Testing Laboratory, Harbin, China, Post Code: 150078)

**Abstract:** In order to study the impact mechanical characteristics of rubber shock absorbers, based on the super-viscoelastic constitutive theory, the impact constitutive model of rubber materials correlated with strain rate was established, and 8 groups of impact tests in a speed range of 3 to 12 m/s were carried out on the Hopkinson pressure rod (SHPB) device, and the stress-strain relationship in a strain rate range of 1 500 to 6 000/s was obtained. A third-order impact strain rate correction model was established. Taking the rubber shock absorber of a certain type of marine power equipment as the research object, the simulation analysis of the drop impact of the shock absorber was carried out in ABAQUS software, and the test was verified to study the influence of shock absorber drop height and structural parameters on the impact

收稿日期: 2022-04-20; 修订日期: 2022-07-18

基金项目: 国家重大科技专项(J2019-IV-0015-0083)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(J2019-IV-0015-0083)

作者简介: 韦子祥(1996-), 男, 南京航空航天大学硕士研究生.

通讯作者: 陈蔚芳(1966-), 女, 南京航空航天大学教授.

characteristics of rubber shock absorber. The results show that the error between the simulated impact stiffness and the test impact stiffness of the rubber shock absorber is 16.49% , which is within the acceptable range of engineering applications, indicating that the impact constitutive model modified by strain rate can reasonably characterize the impact mechanical characteristics of rubber. The impact stiffness increases monotonically with shock absorber drop height, rubber inclination angle and middle diameter length, and decreases monotonically with rubber thickness, among which inclination angle has the greatest influence on stiffness.

**Key words:** SHPB, nitrile rubber, constitutive model, impact stiffness, strain rate

引 言

水面船舶海上航行时,由水下远场冲击载荷产生的强大冲击波将会通过船体传递至船用动力设备。若动力设备发生冲击损坏将会影响船舶的持续生存能力,因此为提高设备的抗冲安全性,在动力设备与基座之间安装橡胶减振器成为目前比较有效的手段<sup>[1]</sup>。

橡胶属于一类高分子聚合物,其力学特性十分复杂,在不同的外界环境下可以表现出不同的使用特性。目前,国内外学者对于橡胶材料与橡胶减振器已经开展了大量研究<sup>[2-6]</sup>,但大多着眼于常规载荷环境下的使用特性,对于冲击环境下的特性研究不多。林玉亮等人<sup>[7]</sup>以硅橡胶材料为研究对象,采用霍普金森压杆(SHPB)装置开展了冲击环境下的力学试验,并利用应变能原理建立了考虑应变率效应的冲击本构模型。毛怀源等人<sup>[8]</sup>利用 SHPB 装置对高阻尼橡胶的冲击应变率相关性进行了试验研究,采用较为常见的超弹性本构模型对试验结果进行拟合,选取了最优拟合结果。Wang 等人<sup>[9]</sup>研究了弹性体材料在低、中、高应变范围内的应力应变关系,并以 9 参数 Mooney-Rivlin 超弹性本构模型为基底,建立了应变率修正的冲击本构模型。曾诚<sup>[10]</sup>以某船用橡胶减振器为研究对象,采用跌落冲击试验方法对减振器冲击刚度迟滞特性开展了研究,建立了非线性冲击响应数值建模流程。黄映云等人<sup>[11]</sup>利用轻气炮加载技术实现了橡胶减振器的冲击刚度试验,并探究了刚度随冲击脉宽和强度的变化规律。

本文提出应变率修正超-粘弹性叠加本构的方法来构建冲击本构模型,然后采用 SHPB 技术对丁腈橡胶材料开展不同应变率下的冲击特性试验。以某型船用圆形橡胶减振器为研究对象,开展跌落环

境下的冲击特性仿真,并在落锤式冲击试验台上进行试验验证。最后探究跌落与结构参数对减振器冲击特性的影响规律,为工程应用提供参考。

1 橡胶冲击本构模型

橡胶材料具有超弹性与动态粘性特征,且会随着外界载荷的变化而改变。当承受高强度的冲击载荷时,由于作用时间较短,橡胶内部的分子链段在变形过程中的延展时间急剧减小,使橡胶材料的刚性显著增加;同时分子链间的弹性接触力增加会使粘性阻尼耗散现象发生变化,即具有应变率相关效应。目前尚无一种公认的冲击本构能够描述任意材料与载荷条件下的冲击力学行为,本文采用如下组合本构模型来表征应变率相关的冲击行为:

$$\sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon},t) = A(\dot{\varepsilon})[\sigma_h(\varepsilon) + \sigma_v(t)] \tag{1}$$

式中:  $\sigma(\varepsilon,\dot{\varepsilon},t)$ — 橡胶材料的冲击应力,MPa;  $\sigma_h(\varepsilon),\sigma_v(t)$ —超弹性应力与粘弹性应力,MPa;  $A(\dot{\varepsilon})$ —应变率相关的修正数; $\varepsilon$ —应变; $\dot{\varepsilon}$ —应变率,/s; $t$ —加载时间,s。

若使用 Mooney-Rivlin 模型作为超弹性应力部分、广义 Maxwell 模型作为粘弹性应力部分,可分别表示为:

$$\sigma_h(\lambda) = 2(1 - \lambda^{-3})(\lambda \frac{\partial W}{\partial I_1} + \frac{\partial W}{\partial I_2}) \tag{2}$$

$$\sigma_v(t) = \int_0^t E(t - \tau) d\tau \tag{3}$$

式中:  $\lambda$ — 试样的伸长率; $I_1, I_2$ — 第一、二格林应变不变量; $E$ — 粘弹损耗模量; $\tau$ — 积分算子。

应变能密度  $W$  与松弛模量  $E(t)$  分别为:

$$W(I_1, I_2) = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \tag{4}$$

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=1}^N E_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \tag{5}$$

式中:  $C_{10}, C_{01}$ —超弹性模型系数; $E_{\infty}$ —长时模量;  $E_i, \tau_i$ —第  $i$  个 Maxwell 模型的松弛模量和松弛

时间。

将式(4)代入式(2)、式(5)代入式(3),计算得出:

$$\sigma_h(\lambda) = 2(1 - \lambda^{-3})(\lambda C_{10} + C_{01}) \tag{6}$$

$$\sigma_v(t) = E_\infty t + \sum_{i=1}^N E_i \tau_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \tag{7}$$

联立式(1),(6),(7)得出:

$$A(\dot{\varepsilon}) = \frac{\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, t)}{2(1 - \lambda^{-3})(\lambda C_{10} + C_{01}) + E_\infty t + \sum_{i=1}^N E_i \tau_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}})} \tag{8}$$

由式(8)可知,冲击载荷(高应变率)下的变形应力除以常规载荷下的变形应力,能够得到只与应变率有关的修正系数,即可采用与常规载荷作用下相同的本构表达与计算方法。

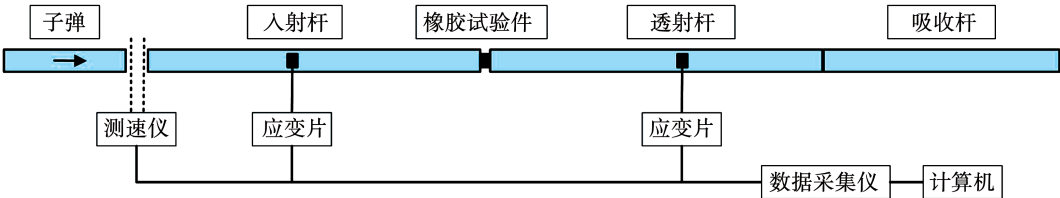


图 1 SHPB 装置结构示意图  
Fig.1 Structural diagram of SHPB device

SHPB 装置在使用过程中需要满足平面应力与均匀化假设,当试件两端应力状态达到平衡时,可以通过经典的二波法计算得到试件的应变率、应变与应力:

$$\dot{\varepsilon} = -2 \frac{C_p}{L_s} \varepsilon_r(t) \tag{9}$$

$$\varepsilon = -2 \frac{C_p}{L_s} \int_0^t \varepsilon_r(t) dt \tag{10}$$

$$\sigma = \frac{A}{A_s} E_p \varepsilon_t(t) \tag{11}$$

式中,  $A, A_s$ —入射杆与试件的横截面积,  $m^2$ ;  $E_p$ —杆的弹性模量,  $MPa$ ;  $C_p$ —杆的波速,  $m/s$ ;  $L_s$ —试件初始厚度,  $m$ ;  $\varepsilon_r(t), \varepsilon_t(t)$ —反射应变信号与透射应变信号。

2.2 设备与方案

试验使用的分离式 SHPB 装置如图 2 所示。入射杆与透射杆长度均为 1 500 mm,杆截面直径均为 14.5 mm,材质均为铝合金。试验用试样由硬度为 50 HA 的丁腈橡胶制成,由于橡胶材料较软,为了在

2 SHPB 冲击试验

2.1 试验原理

SHPB 装置基本结构如图 1 所示,由发射装置、入射杆、透射杆、吸收杆、缓冲装置、测速装置以及采集设备构成。试验时,通过发射装置中的压缩气源加速子弹,子弹与入射杆碰撞后产生一维轴向应力波。应力波在入射杆内向前传播,通过橡胶试件时一部分能量透过试件传递至透射杆形成透射波信号,另一部分能量经过试件时会产生反射形成反射波信号在入射杆回程传播。通过入射杆与透射杆上的应变片可采集试验过程中的应变信号,经过处理后即可获得试件的应力-应变关系。

试验过程中较快达到应力平衡状态,试件厚度应尽可能小。因此,选定试验用试件为直径 10 mm、厚度 2 mm 的圆柱状橡胶片。试验时,在透射杆截面上涂抹适量的凡士林润滑剂,将试件贴合在透射杆端面上。保证试件中心与杆中轴线平齐对中,调整透射杆的位置使其透射端面与试件另一端面轻轻接触。试件装夹完成后如图 3 所示。



图 2 SHPB 装置  
Fig.2 SHPB device



图 3 橡胶冲击试件装夹

Fig. 3 Rubber impact test piece installation

试验开始前需设定气源压力,不同气源压力代表不同的子弹冲击入射速度,进而可以实现不同的加载应变率。设定气源压力为 0.1 MPa,测速仪显示子弹经炮管加速后的射出速度为 4 m/s。

图 4 为通过二波法计算得到的压杆应变信号随时间变化曲线。由图 4 可知,入射信号、反射信号与透射信号都比较规则完整,说明测试过程及应变片状态比较正常。

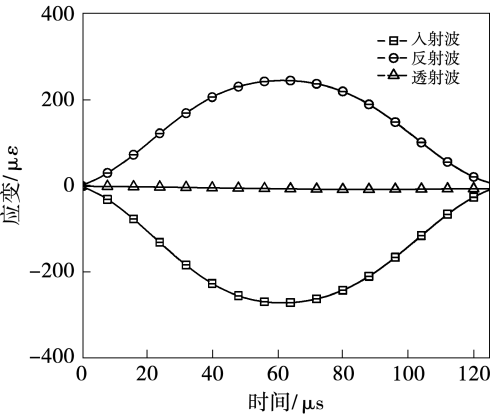


图 4 应变波形随时间变化

Fig. 4 Strain waveform changes with time

图 5 为试验过程中二波法应变率随时间变化曲线。由图 5 可知,在中部时间段内应变率出现了平台现象,说明橡胶试件在试验过程中达到了应力平衡状态,实现了常应变率加载,试验结果较为可靠。

2.3 结果分析

通过设定不同的发射压力,在 SHPB 装置中进行了速度范围为 3 ~ 12 m/s 的 8 组试验,获得了不同应变率下(1 500 ~ 6 000/s)的应力 - 应变曲线,

如图 6 所示。

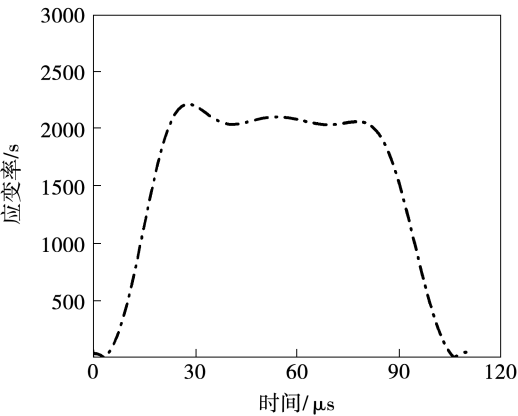


图 5 应变率随时间变化

Fig. 5 Strain rate changes with time

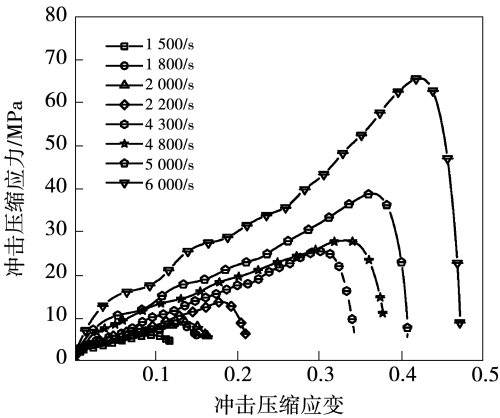


图 6 不同应变率下的丁腈橡胶材料应力 - 应变关系

Fig. 6 Stress-strain relationship of nitrile rubber material at different strain rates

由图 6 可知,无论处于何种应变率,橡胶试件的应力 - 应变曲线变化趋势均较为相似。冲击加载过程大致可以分为 3 个阶段:当入射杆开始压缩试件时,应力随着应变增加迅速增加,由于试件端面不完全平整、与杆端面平行度存在误差等原因,这一阶段曲线会出现一定程度的振荡;随着杆件的进一步压缩,当压力接近应力峰值时,橡胶材料出现了屈服现象,应力随应变增加趋势减缓;当杆件加载至试件出现应变软化现象时,应力快速下降。随着应变率增加,第 1 阶段曲线上升趋势明显增加,说明高应变率下橡胶材料会出现硬化现象。

为了在较宽应变率范围内进行冲击本构建模,以已有研究的丁腈橡胶超弹性、粘弹性本构参数为

基准值<sup>[12]</sup>,动态仿真模拟压缩试验历程,并获取应力-应变关系,对应的应变率为:

$$\dot{\varepsilon}_0 = \frac{v}{L} = 0.013$$

(12)

式中: $v$ —为压缩加载速度,取 1.56 mm/min; $L$ —为压缩试样初始高度,取 2.0 mm。

以模拟压缩应变率为基准应变率,将模拟压缩应力-应变关系乘以适当修正值(应变 20% 以内)获取不同应变率下的修正后曲线如图 7 所示。由图 7 可知,虽然修正后模拟值与试验值存在一定误差,但在整体上可以表达橡胶材料的高应变率硬化现象,说明通过修正进行冲击应变率本构建模可行。

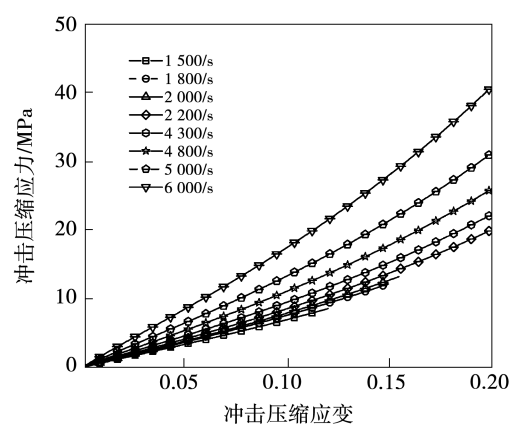


图 7 不同应变率下的应力-应变关系修正曲线  
Fig.7 Stress-strain relationship correction curve at different strain rates

图 8 为修正值分布及拟合情况。其中,横轴为应变率比值  $\varepsilon^* = \dot{\varepsilon}/1\,000\dot{\varepsilon}_0$ ,纵轴为应变率修正值。可见,修正值与应变率比值近似呈多项式分布。

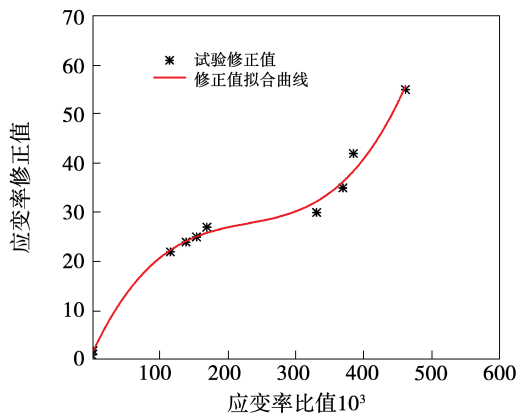


图 8 不同应变率下修正值及其拟合曲线  
Fig.8 Correction value and fit curve at different strain rates

因此,设定式(8)中应变率修正系数  $A(\dot{\varepsilon})$  的表达式为:

$$A(\dot{\varepsilon}) = a + b\varepsilon^* + c(\varepsilon^*)^2 + d(\varepsilon^*)^3$$

(13)

式中: $a, b, c, d$ —待定参数。

根据式(13),采用最小二乘法对不同应变率下的修正值进行拟合,获得应变率修正函数系数  $a, b, c, d$  分别为 1.002, 0.741, -0.004 和  $5.976 \times 10^{-6}$ 。

3 冲击刚度特性分析

3.1 减振器冲击刚度特性仿真

某船用橡胶减振器结构如图 9 所示。其中,金属底座与船体相连,丁腈橡胶部分通过硫化工艺与金属上盖、底座相连,通过顶部安装螺杆与负载设备连接。图中  $t, \beta, L$  分别为丁腈橡胶的厚度、倾角和中径长度。

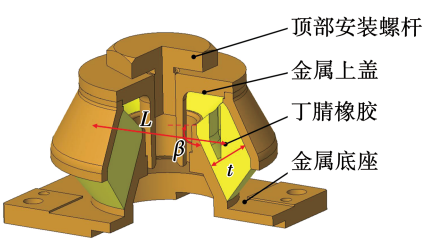


图 9 橡胶减振器有限元仿真模型  
Fig.9 Finite element simulation model of rubber shock absorber

在 ABAQUS 软件中建立减振器的仿真模型,步骤如下:

- (1) 顶部安装螺杆、金属上盖、底座的材料均为结构钢,其密度为  $7\,850\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为  $2.06 \times 10^{11}\text{ Pa}$ ,泊松比为 0.29。丁腈橡胶材料密度设定为  $970\text{ kg/m}^3$ ,并添加冲击本构模型。
- (2) 由于丁腈橡胶与金属上盖、金属底座间属于硫化工艺粘接,在交界面上法向不可分离、切向不可滑动,因此设定丁腈橡胶的上、下表面与金属上盖的底部及金属底座的上部间均为固定连接。同时,顶部安装螺杆与金属上盖通过螺纹连接,不会发生相对运动,因此也设定为固定连接。
- (3) 由于顶部安装螺杆、金属上盖、底座模型中包含较多的曲面特征,因此采用适应性强的线性四面体单元(C3D4)进行划分。对于丁腈橡胶部分,在

中径长方向上截面保持不变,为防止求解过程产生沙漏现象,采用减缩积分杂交单元(C3D8RH)进行扫掠划分,网格尺寸密度设定为4 mm。

(4) 橡胶件规定为冲击速度跌落法的试验工况,在橡胶减振器下方适当位置建立板厚以模拟实际试验时地面的刚性基础。为模拟落锤与橡胶减振器连接,在橡胶件的垂向上方适当位置定义1个集中质量点,质量大小为500*b* kg(*b*为无量纲化系数),并与金属上盖上部圆形承载面建立运动耦合关系,定义全局重力加速度为9.8 m/s<sup>2</sup>,设置厚板下表面为固定约束。仿真模型如图10所示。

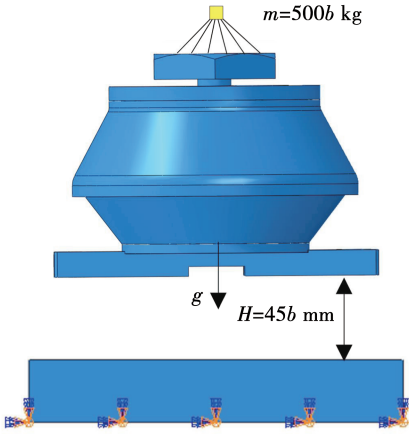


图 10 减振器冲击仿真模型

Fig. 10 Shock absorber impact simulation model

计算完成后得到橡胶减振器的冲击变形-载荷曲线,如图11所示。对图中部分数据进行了无量纲化处理,其中*a*为无量纲化系数。由图11可知,在8 mm变形范围内,由于减振器处于小变形范围内,同时加载速率较高,迟滞特性尚不明显,减振器力学曲线近似为线性分布。

3.2 落锤冲击刚度试验

在落锤式冲击试验机上开展橡胶减振器的冲击试验,该落锤试验台由落锤、刚性底座、机械提升装置、辅助立柱等部分组成,试验要求依据文献[13]进行。落锤式冲击试验机结构如图12所示。

首先将橡胶减振器放置在刚性台面上,然后减振器与上、下转接板刚性连接。通过机械提升装置将落锤质量块缓慢提升到橡胶减振器上方,与上转接板相互连接并安装加速度传感器。完成后将落锤

质量块与橡胶件提升至额定高度45*b* mm后进行自由下落,通过传感器测量冲击过程中两个加速度信号并记录至电脑中。最终试验处理获得的冲击变形-力曲线如图13所示。

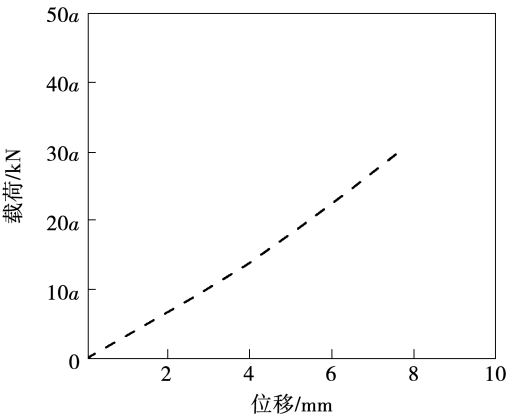


图 11 冲击仿真位移-载荷曲线

Fig. 11 Impact simulation displacement-load curve

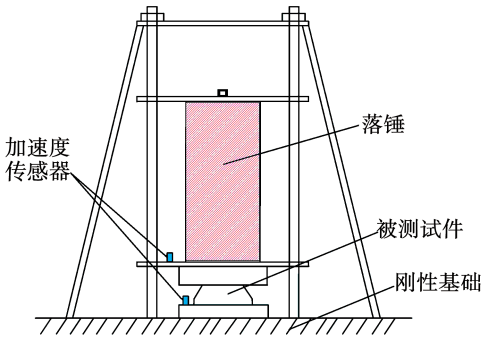


图 12 落锤式冲击试验机结构

Fig. 12 Drop hammer impact machine structure

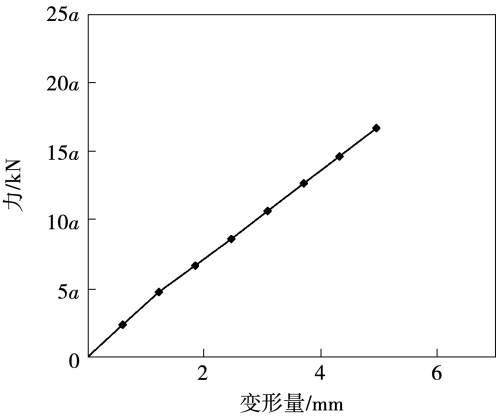


图 13 橡胶减振器冲击试验冲击变形-力曲线

Fig. 13 Impact test deformation-force curve of rubber shock absorber

定义橡胶减振器的冲击刚度为:

$$K_{\text{shock}} = \frac{\Delta F_{\text{shock}}}{\Delta X_{\text{shock}}}$$

(14)

式中:  $\Delta F_{\text{shock}}$  一橡胶减振器的冲击力改变量, N;  
 $\Delta X_{\text{shock}}$  一橡胶减振器的冲击变形量, m。

橡胶减振器试验冲击刚度为 3 363.91*a* N/mm, 仿真冲击刚度值为 3 918.46*a* N/mm, 两者误差为 16.49%, 误差产生的原因在于橡胶冲击本构建模以及试验过程存在累计误差, 但仍处于工程应用可接受范围内, 说明冲击本构模型及仿真方法的合理性。

4 冲击刚度影响因素分析

橡胶减振器承受冲击载荷时, 不同的激励参数会导致冲击刚度发生变化, 橡胶结构参数改变也意味着不同的冲击响应特性。

4.1 跌落高度对冲击刚度的影响

为研究不同跌落高度  $H$  对橡胶减振器冲击刚度特性的影响规律, 保持橡胶结构尺寸参数( $t, \beta, L$ )不变, 分别开展了 30*b*, 37.5*b*, 45*b*, 52.5*b* 和 60*b* mm 跌落高度下橡胶减振器的冲击仿真分析。不同跌落高度下的冲击刚度如图 14 所示(图中  $b$  为无量纲化系数)。由图可见, 随着跌落高度的增加, 冲击刚度呈现出单调增加的变化趋势。这是由于跌落高度较大时, 橡胶件瞬时冲击应变率较大, 橡胶硬化更为明显。跌落高度从 30*b* 增加至 60*b* mm, 冲击刚度从 3 593.81*a* 增加至 4 050.99*a* N/mm, 增加了 8.20%。

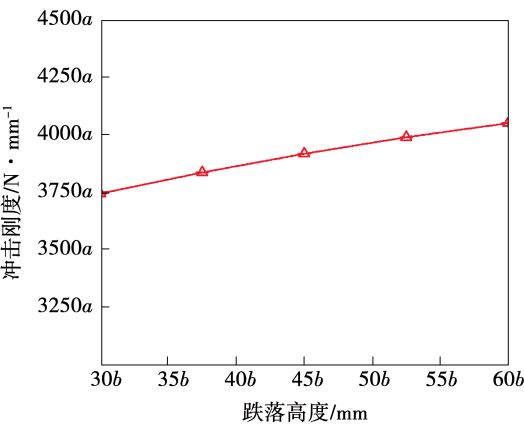


图 14 跌落高度对橡胶件冲击刚度的影响  
Fig. 14 Effect of drop height on impact stiffness of rubber

4.2 厚度对冲击刚度的影响

保持跌落高度  $H$ 、橡胶倾角  $\beta$  以及中径长  $L$  不变, 改变橡胶厚度  $t$ 。建立橡胶厚度分别为 15*b*, 16.25*b*, 17.5*b*, 18.75*b* 和 20*b* mm 的橡胶减振器三维模型, 导入 ABAQUS 中进行冲击仿真分析, 材料本构模型及边界条件保持不变。不同厚度下橡胶减振器冲击刚度如图 15 所示。由图可知, 随着橡胶厚度的增加, 橡胶减振器的冲击刚度逐渐下降, 并呈现一定的非线性, 下降趋势随厚度增加逐渐变缓。厚度从 15*b* 增加至 20*b* mm, 冲击刚度从 5 497.85 下降至 2 942.77*a* N/mm, 下降了 46.47%。

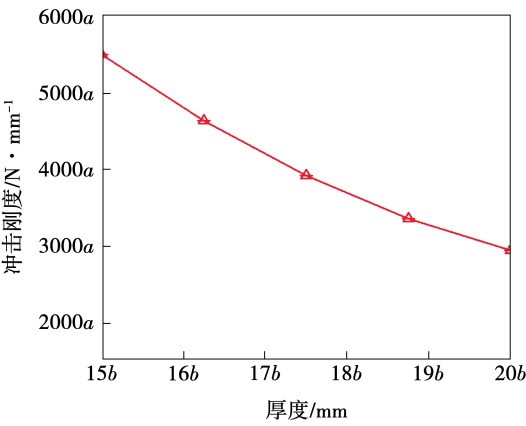


图 15 厚度对橡胶件冲击刚度的影响  
Fig. 15 Effect of thickness on impact stiffness of rubber

4.3 倾角对冲击刚度的影响

保持跌落高度  $H$ 、橡胶厚度  $t$  以及中径长  $L$  不改变, 改变橡胶倾角  $\beta$ 。建立橡胶倾角分别为 52.5°, 55°, 57.5°, 60° 和 62.5° 的橡胶减振器三维模型, 导入 ABAQUS 中进行冲击仿真分析, 材料本构模型及边界条件保持不变。倾角对冲击刚度的影响如图 16 所示。由图可知, 随着橡胶倾角的增加, 橡胶减振器的冲击刚度逐渐增加, 并呈现近似线性变化趋势, 倾角从 52.5° 增加至 62.5°, 冲击刚度从 2 452.32*a* 增加至 5 570.87*a* N/mm, 增加了 52.81%。

4.4 中径长对冲击刚度的影响

保持跌落高度  $H$ 、橡胶厚度  $t$  以及倾角  $\beta$ , 改变橡胶中径长  $L$ 。建立橡胶中径长分别为 110*b*, 120*b*, 130*b*, 140*b* 和 150*b* mm 的橡胶减振器三维模型, 导

入 ABAQUS 中进行冲击仿真分析,材料本构模型及边界条件保持不变。中径长对橡胶减振器冲击刚度的影响如图 17 所示。由图可知,随着橡胶中径长的增加,橡胶减振器的冲击刚度近似线性增加,中径长从 110*b* 增加至 150*b* mm,冲击刚度从 3 189.44*a* 增加至 4 543.61*a* N/mm,增加了 42.45%。

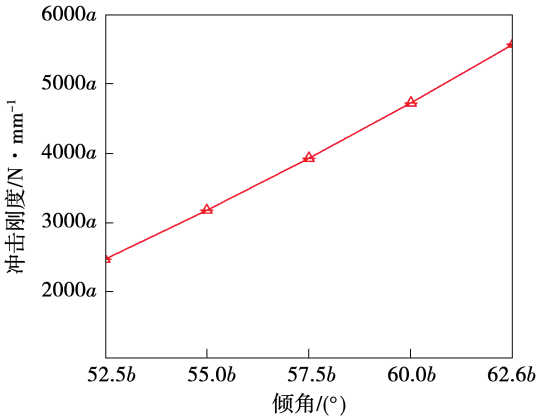


图 16 倾角对橡胶件冲击刚度的影响

Fig. 16 Effect of inclination on impact stiffness of rubber

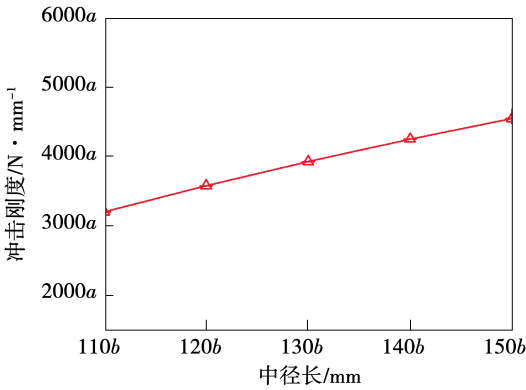


图 17 中径长对橡胶件冲击刚度的影响

Fig. 17 Effect of medium diameter length on impact stiffness of rubber

5 结 论

基于 SHPB 装置试验研究了橡胶应力 - 应变分布与应变率的关系,采用仿真与试验对比验证了橡胶冲击本构模型的可行性,开展了某船用橡胶减振器冲击刚度的影响因素分析,得出结论:

(1) 冲击加载应变率会对橡胶的应力 - 应变关系产生影响,应变率在 1 500 ~ 6 000 /s 范围内,随

着应变率逐渐增加,橡胶呈现出渐硬现象,采用 3 次修正函数模型能够较好符合应变率修正系数的分布。

(2) 橡胶减振器仿真冲击刚度与试验误差为 16.49%,说明了冲击本构以及仿真建模的可行性。

(3) 减振器冲击刚度与跌落高度、倾角、中径长均呈正相关,在分析范围内分别增加了 8.20%,52.81%,42.4%;与厚度呈负相关,减少了 46.47%;受倾角的影响最大。

参考文献:

[1] 朱晓健. 舰船橡胶隔振器冲击特性试验方法研究[D]. 上海: 上海交通大学,2009.  
ZHU Xiao-jian. Test research on impact characteristics of shock isolator [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2009.

[2] 智杰颖,路洪丽,王海庆,等. 基于广义 Maxwell 模型的轮胎橡胶动态压缩性能分析[J]. 高分子学报,2016(7):887-894.  
ZHI Jie-ying, LU Hong-li, WANG Hai-qing, et al. Analysis on dynamic compression performance of tire rubber based on generalized maxwell model[J]. Acta Polymerica Sinica,2016(7):887-894.

[3] 周相荣,王 强,涂耿伟. 弯曲型橡胶缓冲器冲击试验与数值仿真[J]. 振动与冲击,2007,26(4):97-100,172.  
ZHOU Xiang-rong, WANG Qiang, TU Geng-wei. Impact test and simulation for rubber shock absorbers of bending structures[J]. Journal of Vibration and Shock,2007,26(4):97-100,172.

[4] 魏志刚,陈效华,吴沈荣,等. 橡胶衬套材料参数确定及有限元仿真[J]. 机械工程学报,2015,51(8):137-143.  
WEI Zhi-gang, CHEN Xiao-hua, WU Shen-rong, et al. Material parameters determination and simulation of rubber bushing[J]. Journal of Mechanical Engineering,2015,51(8):137-143.

[5] YANG Rong-zhou, XU Ying, CHEN Pei-yuan, et al. Experimental study on dynamic mechanics and energy evolution of rubber concrete under cyclic impact loading and dynamic splitting tension [J]. Construction and Building Materials,2020,262:120071.

[6] 唐振寰. 橡胶隔振器动力学建模及动态特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学,2013.  
TANG Zhen-huan. Research on dynamic modeling and dynamic properties of rubber isolator [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2013.

[7] 林玉亮,卢芳云,卢 力. 高应变率下硅橡胶的本构行为研究[J]. 高压物理学报,2007(3):289-294.  
LIN Yu-Liang, LU Fang-yun, LU Li. Constitutive behaviors of a silicone rubber at high strain rates[J]. Chinese Journal of High Pres-

sure Physics,2007(3):289-294.

[ 8 ] 毛怀源,李秀地,许珂,等.高阻尼橡胶的动态压缩性能及其应变率相关的本构模型[J].当代化工,2018,47(10):2186-2192.

MAO Huai-yuan, LI Xiu-di, XU Ke, et al. Dynamic compressive properties of high damping rubber and its strain rate related constitutive model[J]. Contemporary Chemical Industry,2018,47(10):2186-2192.

[ 9 ] WANG Hao, DENG Xi-min, WU Hai-jun, et al. Investigating the dynamic mechanical behaviors of polyurea through experimentation and modeling[J]. Defence Technology,2019,15(6):875-884.

[10] 曾诚.橡胶隔振器非线性抗冲击理论建模与试验研究[D].上海:上海交通大学,2012.

ZENG Cheng. Theoretic modeling and experimental analysis of non-linear shock characteristics of rubber isolator[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2012.

[11] 黄映云,何琳,谭波,等.橡胶隔振器冲击刚度特性试验研究[J].振动与冲击,2006,25(1):77-78,85,167.

HUANG Ying-yun, HE Lin, TAN Bo, et al. Experimental research on the shock characteristics of rubber isolators[J]. Journal of Vibration and Shock,2006,25(1):77-78,85,167.

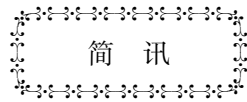
[12] 韦子祥,邱中辉,王旦,等.温度对橡胶隔振器刚度阻尼特性的影响[J].机械与电子,2022,40(2):23-28.

WEI Zi-xiang, QIU Zhong-hui, WANG Dan, et al. Effects of temperature on the stiffness damping characteristics of the rubber vibration isolator [J]. Machinery & Electronics, 2022, 40(2):23-28.

[13] GB/T 15168-2013,振动与冲击隔离器静、动态性能测试方法[S].

GB/T 15168-2013, Vibration and shock isolators measuring method for its static and dynamic characteristics[S].

(刘颖编辑)



## 埃尼公司在意大利海岸安装波浪能转换器

日前,埃尼公司在距离潘泰莱里亚海岸约 800 m 的地方安装了一台 260 kW 的惯性海浪能转换器 (ISWEC) 装置。该装置由一个 8 m × 15 m 的钢船体组成,其中包含两个直径超过 2 m 的陀螺仪装置组成的能量转换系统,并由一个系泊系统固定在 35 米深的海床上,该系泊系统由三条系泊线和一个旋转接头组成,可对天气和海况做出反应。其产生的电力通过水下电缆传输到岸上,与意大利潘泰莱里亚岛电网连接。在潘泰莱里亚岛安装 ISWEC 是该岛脱碳的第一步,符合能源转型议程。

ISWEC 技术是由埃尼公司与都灵理工大学及其下属的 Wave for Energy S. R. L 公司合作开发的。它将波动转化为电能,然后为近海基础设施、独立小岛和沿海社区提供能源。埃尼公司表示,因为海浪在白天和晚上都可以获得,所以海浪能比太阳能和风能更可预测、更恒定,且能量密度更高。该技术的另一个优点是大大减少对景观的影响,因为该设备仅高于海平面 1 米。此外,ISWEC 可以与风力发电机等其他海上可再生能源发电系统集成。由于提高了连接系统的价值,并可以与同一海域的其他设施集成,从而最大限度地转换可用能源。欧盟委员会在其海上可再生能源战略中提到 ISWEC 技术是海浪能转换的一个关键示范项目。

(孙嘉忆摘译自 [https://www. powerengineeringint. com](https://www.powerengineeringint.com))