

# 高阻尼黏弹性减震器的动力性能及等效内变量高阶分数导数模型研究

董尧荣<sup>1,2</sup> 徐赵东<sup>3</sup> 朱丽华<sup>1,2</sup> 李强强<sup>1,2</sup> 成羽<sup>1,2</sup> 田耘<sup>1,2</sup>

1. 西安建筑科技大学土木工程  
学院, 陕西西安 710055

2. 西安建筑科技大学结构工程  
与抗震教育部重点实验室,  
陕西西安 710055

3. 东南大学中国-巴基斯坦  
重大基础设施智慧防灾一带  
一路联合实验室, 江苏南  
京 210096

**摘要:** 近年来, 黏弹性减震技术被引入土木结构振动控制领域, 用于结构的抗震性能提升。该文自主研制高阻尼黏弹性减震器(HDVED), 较好地解决黏弹性减震器在土木结构中的中高温域环境服役且在地震作用下低频减震控制的关键问题。为揭示频率、温度和位移幅值对HDVED力学特性和减震耗能性能的影响规律, 在不同频率、温度和位移幅值下对HDVED进行动态力学性能试验研究。结果表明, HDVED在中高温域且低频率加载下表现出优异的减震耗能能力和环境适应能力, 其动态力学性能和耗能能力对频率、温度和位移幅值均表现出较强的依赖性且耦合效应明显。在此基础上, 提出HDVED的等效内变量高阶分数导数模型, 并对该模型的有效性和准确性进行试验验证。结果表明, 所提出的等效内变量高阶分数导数模型能够综合描述激励频率、环境温度 and 位移幅值对HDVED动态力学性能的影响。该模型能够较准确地预测在不同频率、温度和位移幅值下HDVED的力学性能。可为黏弹性减震结构动力响应分析与设计提供重要基础。

**关键词:** 低频减震控制; 高阻尼黏弹性减震器; 动态力学性能试验; 等效内变量高阶分数导数模型

**中图分类号:** TU375.4 TU973+.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2026)01-0013-15

**DOI:** 10.15951/j.tmgxb.24050359

## Dynamic performances and high-order fractional derivative models with equivalent internal variables of high-damping viscoelastic dampers

Dong Yaorong<sup>1,2</sup> Xu Zhaodong<sup>3</sup> Zhu Lihua<sup>1,2</sup> Li Qiangqiang<sup>1,2</sup> Cheng Yu<sup>1,2</sup> Tian Yun<sup>1,2</sup>

1. School of Civil Engineering,  
Xi'an University of Architecture &  
Technology, Xi'an 710055, China

2. Key Lab of Structural Engi-  
neering & Earthquake Resistance  
of the Ministry of Education,  
Xi'an University of Architecture &  
Technology, Xi'an 710055, China

3. China-Pakistan Belt and  
Road Joint Laboratory on Smart  
Disaster Prevention of Major In-  
frastructures, Southeast Univer-  
sity, Nanjing 210096, China

**Abstract:** In recent years, viscoelastic damping technology has been introduced into the vibration control for seismic performance enhancement of civil structures. In this study, a high-damping viscoelastic dampers (HDVED) is developed to solve the critical issues of VED for a middle-high temperature environments serving in civil structures and for low-frequency damping control under seismic action. To reveal the influence rule of frequency, temperature and displacement amplitude on the mechanical properties and seismic energy dissipation performance of HDVED, the dynamic mechanical properties of HDVED are experimentally investigated at different frequencies, temperatures and displacement amplitudes. The results show that HDVEDs exhibit excellent vibration damping and energy dissipation capabilities and environmental adaptability under middle-high temperature range and low frequency loading. Their dynamic mechanical properties and energy dissipation

**基金项目:** 国家自然科学基金(52208503)、陕西省教育厅重点科学研究计划(22JY029)、陕西省重点研发计划(2024SF-YBXM-652)、中国博士后基金(2023MD734205)、国家自然科学基金重点项目(52130807)和教育部长江学者奖励计划

**作者简介:** 董尧荣, 博士, 副教授 **通信作者:** 徐赵东, 博士, 教授 **收稿日期:** 2024-05-13

capabilities show strong dependence on frequency, temperature and displacement amplitude with obvious coupling effects. On this basis, an equivalent high-order fractional derivative model of HDVED with internal variables is proposed, and the accuracy of the model are experimentally verified. The results show that the proposed equivalent high-order fractional derivative model with internal variables can comprehensively describe the effects of excitation frequency, ambient temperature and displacement amplitude on the dynamic mechanical properties of HDVED. The model is able to predict the mechanical properties of HDVED under different frequencies, temperatures, and displacement amplitudes more accurately. This research can provide reference for the dynamic response analysis and structural design of viscoelastic damped structures.

**Keywords:** low-frequency damping control; high-damping viscoelastic dampers; dynamic mechanical performance tests; equivalent high-order fractional derivative model with internal variables

**E-mail:** xzds submission@163.com

## 0 引 言

近年来,黏弹性减震器(VED)减震技术被引入土木结构振动控制领域,用于结构的抗震性能提升<sup>[1-3]</sup>。VED具有性能优越可靠、造价低廉等优势,在实际工程中具有很好的应用前景<sup>[4-6]</sup>。为了推动VED减震技术在土木工程领域的应用与发展,国内外许多学者对VED进行了大量理论和试验的研究,并已经取得丰硕的研究成果。

国际上,Dall'Asta等<sup>[7]</sup>对加入黑碳填料的VED进行了不同应变速率和应变幅值的力学性能试验研究。Palmeri等<sup>[8]</sup>提出了一种装有VED建筑结构的时域动力分析数值方法。Mehrabi等<sup>[9]</sup>开发了一种旋转支撑VED,并通过振动台试验验证了该减震器对钢框架位移和加速度控制的有效性。Lewandowski等<sup>[10]</sup>提出了一种黏减震结构动力特性分析方法,该方法考虑了温度对VED系统动力特性的影响。Xiang等<sup>[11]</sup>综合考虑了激励不确定性和温度波动的影响,建立了一个评价VED有效性的概率框架。Eskandari Nasab等<sup>[12]</sup>对加设VED的4层钢框架结构进行了易损性分析,结果表明减震器可大幅降低结构超越所有极限状态的概率。在国内,赵刚等<sup>[13]</sup>对VED在不同温度、频率和幅值下进行了动态力学性能试验,研究了减震器力学性能的变化规律。周颖等<sup>[14]</sup>对带6个VED的钢框架结构进行了振动台试验研究。许俊红等<sup>[15]</sup>进行了加设黏阻尼墙的4层钢框架振动台试验研究。周云等<sup>[16]</sup>对3个VED进行了不同频率和位移幅值的力学性能试验研究。王玉璋等<sup>[17]</sup>对高阻

尼黏橡胶连梁减震器进行了力学性能试验研究,结果表明该减震器的耗能能力优良。王道航等<sup>[18]</sup>设计并制作了五类黏弹性叠层复合材料减震器,并对其进行了变形和加载频率相关性的性能试验研究。董尧荣、徐赵东等<sup>[19-21]</sup>对VED进行了系列力学性能试验,并对黏减震结构进行了抗震设计参数、损伤演化及模拟地震混合试验研究。

为了能够准确描述VED的复杂力学行为,一些学者对其力学模型进行了研究。一些学者提出了能够反映VED频率依赖性的力学模型,例如Maxwell模型、Kelvin模型、标准线性固体模型、Burgers模型、标准线性固体模型、广义Maxwell模型和广义Kelvin模型<sup>[22-24]</sup>。Nasab等<sup>[25]</sup>建立了可较好地考虑频率和幅值的对VED力学行为影响的修正Bouc-Wen-Baber-Noori模型,并进行了试验验证。Wei等<sup>[26]</sup>提出了一种可较好地考虑频率对VED力学行为影响的广义超黏力学模型。Singh等<sup>[27]</sup>提出了一种能够考虑VED在地震作用下频率依赖性的力学模型。黄兴淮等<sup>[28]</sup>开发了一种等效标准固体模型的时域延拓方法,该方法可以计算在任意激励作用下VED的时域动力响应。

综上所述,可发现VED减震技术在土木结构振动控制领域具有较大的推广与应用的潜力。传统的VED大多适用于高频振动控制领域,且在中高温域且低频率加载下减震耗能能力和环境适应能力较弱,难以较好地满足土木结构在地震作用下的低频振动控制和中高温域环境服役需求。同时,传统的力学模型大多仅能描述单一因素(如频率)对VED动态力学性能的影响,因此对VED建立能够考虑多因素影

响的精细化力学模型非常必要。本文在不同频率、温度和位移幅值下对自主研发的高阻尼黏弹性减振器(HDVED)进行了动态力学性能试验。研究了频率、温度和位移幅值对 HDVED 力学特性和减振耗能性能的影响规律。在此基础上,提出了 HDVED 的等效内变量高阶分数导数模型,并对该模型的有效性和准确性进行了试验验证。

## 1 HDVED 动态力学性能试验研究

### 1.1 减振器试件研制

本文自主研发的 1 个 HDVED 试件,如图 1 所示。HDVED 试件由高耗能黏弹性材料核心耗能层、中间钢板及外侧约束钢板通过高温高压硫化而成。与核心耗能层相连接的钢板面上均设置有黏结增强槽纹(槽纹宽度和深度为 1~2 mm),槽纹可增大钢板与黏弹性材料核心耗能层的连接面积,进而增强其连接性能。HDVED 构造及详细尺寸如图 1 所示。

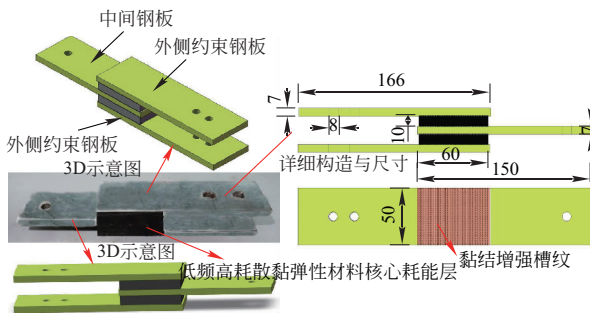


图 1 HDVED 构造及详细尺寸(单位: mm)

Fig. 1 Structures and detailed dimensions of HDVED(unit: mm)

### 1.2 试验系统与加载工况

#### 1.2.1 试验加载系统

HDVED 的动态力学性能试验在东南大学中国-巴基斯坦重大基础设施智慧防灾“一带一路”联合试验的液压伺服动态疲劳试验机上完成,其试验加载及控制系统如图 2 所示。HDVED 的加载的频率和位移由计算机控制,温度采用 THJ-B415 智能温控箱进行控制,其温度波动度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,升温速率大于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,降温速率大于 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。每一组工况之间间隔时间在 30 min 以上,使 HDVED 温度控制和性能达到稳定状态。

#### 1.2.2 试验加载工况

VED 低温下工作具有高阻尼性能已经得到较好的解决,基于 HDVED 在土木工程中的通常使用特性及现有试验条件,本文在不同频率、温度和位移幅值下对 HDVED 进行动态力学性能试验,为了系统地

研究激励频率、环境温度和位移幅值对 HDVED 的影响规律,HDVED 试件的详细加载工况信息,如表 1 所示。

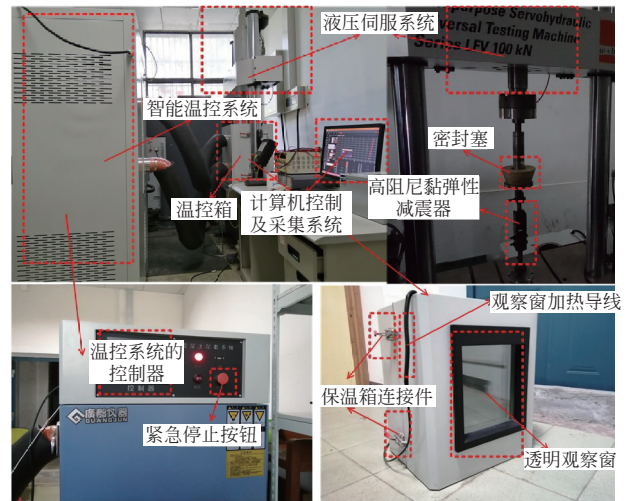


图 2 HDVED 力学性能试验加载系统

Fig. 2 Loading system for mechanical properties test of HDVED

表 1 HDVED 试验工况

Table 1 Test conditions of HDVED

加载频率/Hz	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	位移幅值/mm	加载循环圈数
0.1、0.5、1.5、	5、15、25、	0.5、1.5、	10
2.5、2.5、3.5	35、45	2.5、3.5	

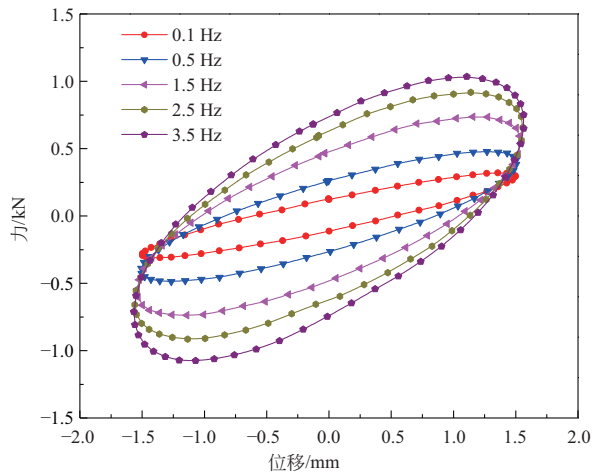
### 1.3 试验结果与分析

#### 1.3.1 滞回曲线分析

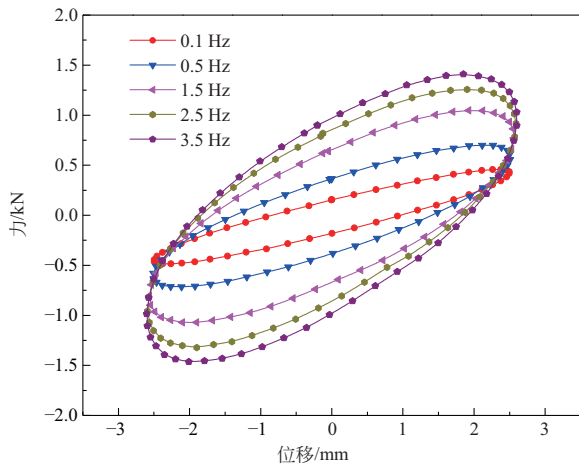
HDVED 在不同激励频率下滞回曲线对比(例如,温度 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,位移幅值 $D=1.5\text{ mm}$ ;温度 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,位移幅值 $D=2.5\text{ mm}$ ),如图 3 所示。由图 3 可知,在各频率下 HDVED 的滞回曲线均为较饱满的椭圆,说明 HDVED 在低频率激励下具有优异的减振耗能能力。HDVED 力学性能具有较强的频率依赖性。随着频率的增大,滞回曲线的饱满程度和长轴斜率逐渐增大。

HDVED 在不同温度下滞回曲线对比(例如,频率 $f=0.3\text{ Hz}$ ,位移幅值 $D=1.5\text{ mm}$ ;频率 $f=0.3\text{ Hz}$ ,位移幅值 $D=2.5\text{ mm}$ ),如图 4 所示。由图 4 可知,在中高温域( $5\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ )且低频率加载下 HDVED 的滞回曲线均为较饱满的椭圆,表明 HDVED 具有优异的减振耗能能力和中高温域环境适应能力。HDVED 力学性能具有较强的温度依赖性。随着温度的上升,滞回曲线的饱满程度和长轴斜率均逐渐减小。当 HDVED 在中等温域( $5\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )时,滞回曲线的饱满程度和长轴斜率较大,随温度的变化较为剧烈。当

HDVED 处于较高温域 (25~45 °C) 时, 滞回曲线的饱满程度和长轴斜率相对较小, 随温度的变化平缓。说明 HDVED 在中高温域表现出优异的减震耗能能力和环境适应能力, 且中等温域性能更优。

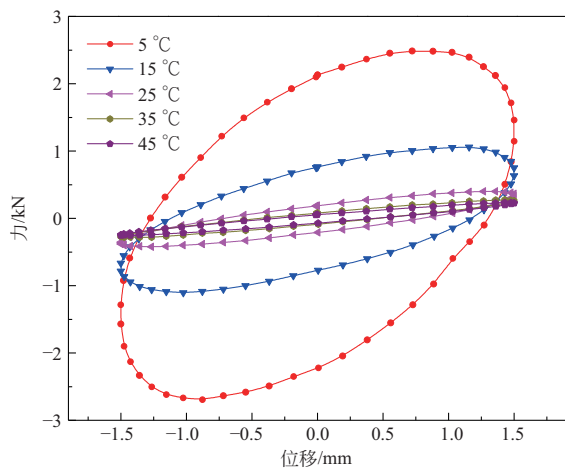


(a)  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D=1.5\text{ mm}$

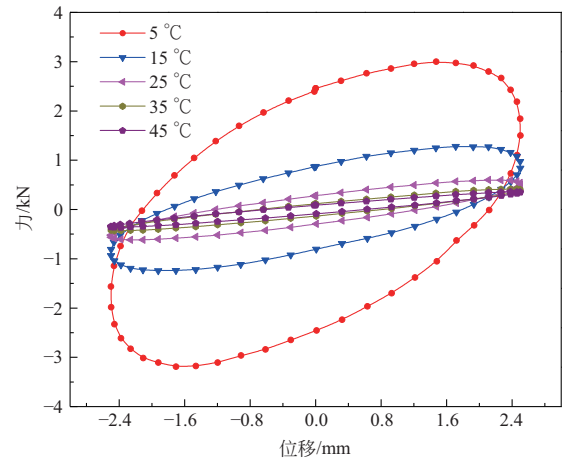


(b)  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D=2.5\text{ mm}$

图 3 不同频率下 LHVED 滞回曲线对比  
Fig. 3 Hysteresis curve comparisons of LHVED at different frequencies



(a)  $f=0.3\text{ Hz}$ ,  $D=1.5\text{ mm}$



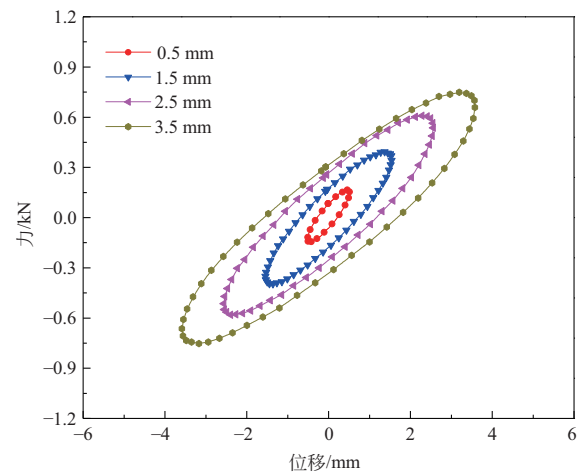
(b)  $f=0.3\text{ Hz}$ ,  $D=2.5\text{ mm}$

图 4 不同温度下 LHVED 滞回曲线对比  
Fig. 4 Hysteresis curve comparisons of LHVED at different temperatures

HDVED 在不同位移幅值下滞回曲线对比 (例如, 温度  $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 频率  $f=1.5\text{ Hz}$ ; 温度  $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 频率  $f=3.5\text{ Hz}$ ), 如图 5 所示。由图 5 可知, 在各位移幅值激励下 HDVED 的滞回曲线均为比较饱满的椭圆, 表明 HDVED 具有优异的减震耗能能力。HDVED 力学性能表现出较强的位移幅值依赖性。随着位移幅值的增大, 滞回曲线的饱满程度和长轴斜率逐渐减小。

### 1.3.2 动态力学性能参数分析

HDVED 在不同激励频率下滞回曲线对比 (例如, 温度  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 位移幅值  $D=1.5\text{ mm}$ ; 温度  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 位移幅值  $D=2.5\text{ mm}$ ), 如图 3 所示。由图 3 可知, 在各频率下 HDVED 的滞回曲线均为较饱满的椭圆, 说明 HDVED 在低频率激励下具有优异的减震耗能能力。HDVED 力学性能具有较强的频率依赖性。随着频率的增大, 滞回曲线的饱满程度和长轴斜率逐渐增大。



(a)  $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $f=1.5\text{ Hz}$

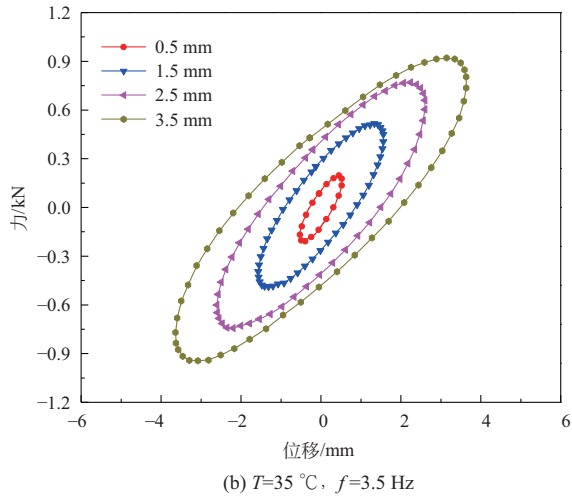


图5 不同位移幅值下 LHVED 滞回曲线对比  
Fig.5 Hysteresis curve comparisons of LHVED at different displacement amplitudes

试验过程中, HDVED 在一个正弦交变位移( $u_d = u_0 \cdot \sin\omega t$ )的激励下, HDVED 的力-位移关系满足以下方程:

$$\left(\frac{F_d - K_e u_d}{\eta K_e u_0}\right)^2 + \left(\frac{u_d}{u_0}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

式(1)即为椭圆方程, 可用图形形式表达, 如图6所示。在式(1)和图6中的  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  及  $u_0$  的值均可以根据 HDVED 的力-位移曲线得到, 则 HDVED 的性能的参数可由下式计算可得:

$$G' = \frac{F_1 \cdot h_v}{\eta_v \cdot A_v \cdot u_0} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{F_2}{F_1} \quad (3)$$

$$G'' = \eta \cdot G' \quad (4)$$

$$E_d = \frac{n_v \pi G'' A_v u_0^2}{h_v} \quad (5)$$

式中:  $G'$  为储能模量;  $G''$  为损耗模量;  $\eta$  为损耗因子;  $E_d$  为单圈耗能;  $A_v$ 、 $n_v$ 、 $h_v$  分别为黏材料层剪切面积, 层数和单层厚度。

$K_e$  和  $C_e$  分别为 HDVED 的等效刚度和等效阻尼, 则有:

$$K_e = \frac{F_1}{u_0} = \frac{n_v G' A_v}{h_v} \quad (6)$$

$$C_e = \frac{\eta K_e}{\omega} = \frac{n_v G'' A_v}{\omega h_v} = \frac{F_2}{\omega u_0} \quad (7)$$

式中:  $\omega$  为加载圆频率。

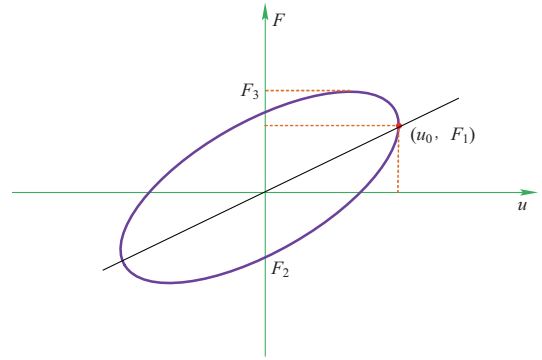
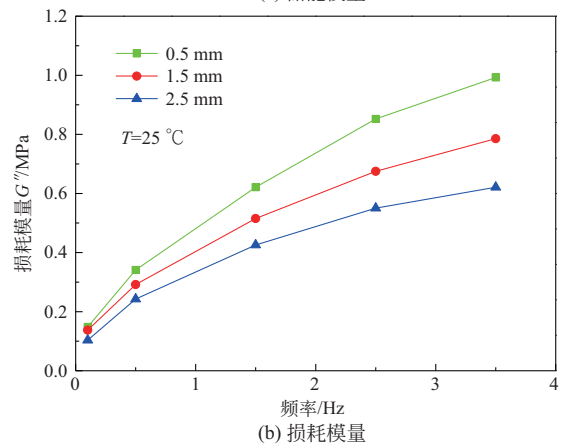
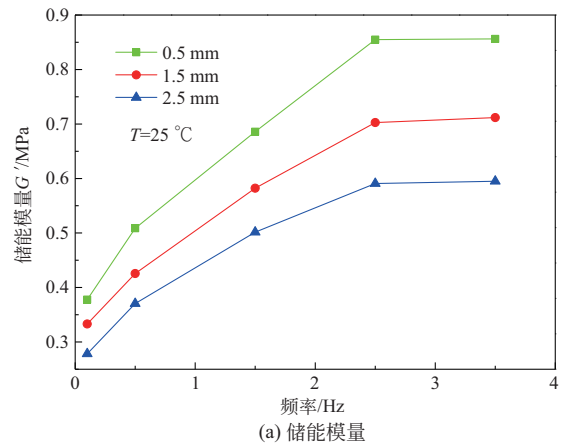


图6 LHVED 滞回曲线的重要参数点  
Fig.6 Important parameter points of the LHVED hysteresis curve

HDVED 的动态力学性能参数随频率的变化曲线, 如图7所示。由图7可知, 在低频激励(0.1~3.5 Hz)下, HDVED 具有优异的减震耗能能力。  $G'$ 、 $G''$ 、 $\eta$ 、 $E_d$ 、 $K_e$  随着激励频率的增大而增大, 其增大速率逐渐减小。但  $C_e$  随着频率的增大而减小, 其减小速率逐渐减小。随着位移幅值的增大,  $G'$ 、 $G''$ 、 $\eta$ 、 $K_e$  的增大速率逐渐减小,  $E_d$  的增大速率逐渐增大,  $C_e$  的减小速率逐渐减小。HDVED 的动态力学性能参数具有较强的频率依赖性。具体表现为, HDVED 动态力学性能参数单位频率的变化量, 如表2所示。激励频率和位移幅值对 HDVED 动态力学性能参数的影响具有明显耦合特性。



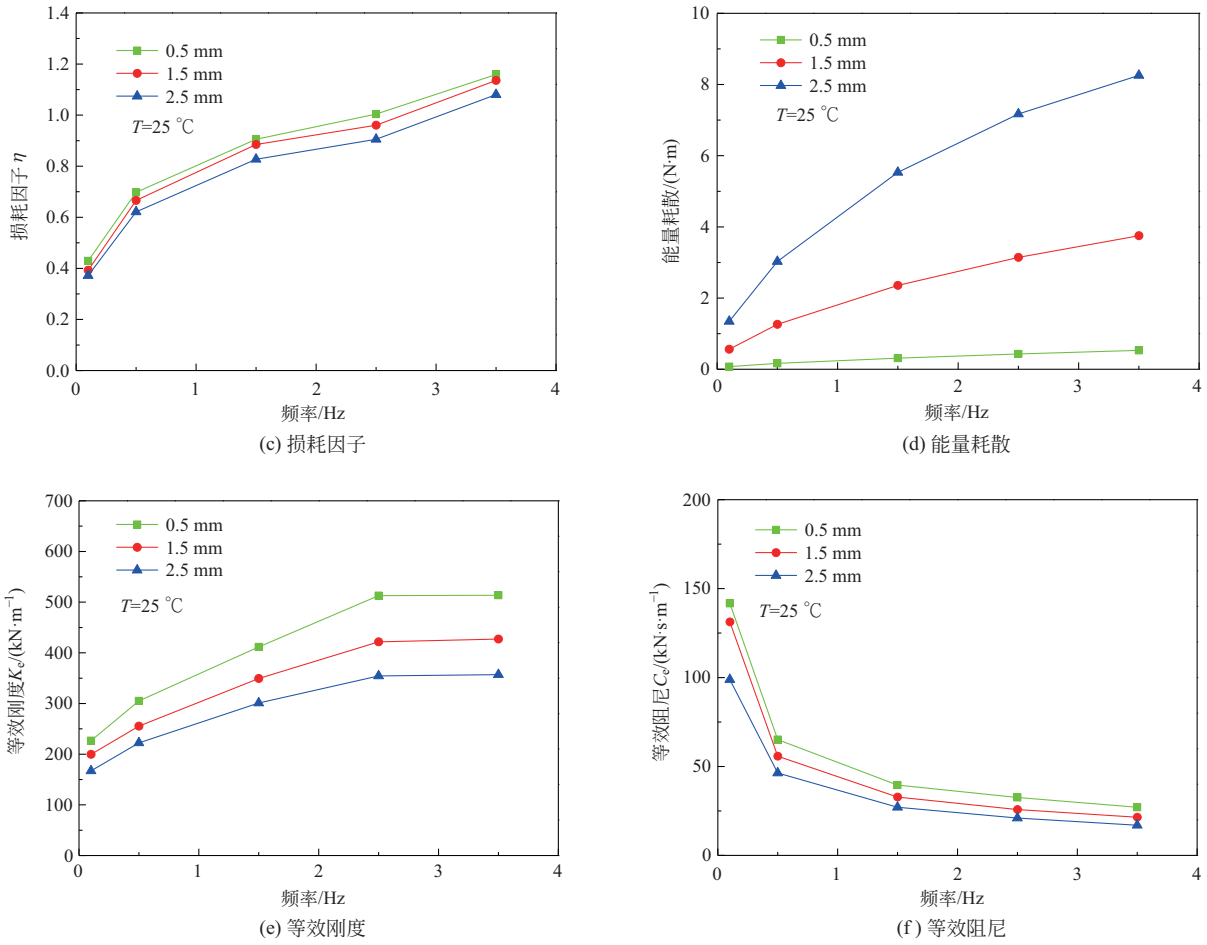


图 7 LHVED 动态力学性能参数随频率的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of LHVED dynamic mechanical property parameters with frequency

表 2 HDVED 动态力学性能参数单位频率的变化量

Table 2 The changed amount of HDVED dynamic mechanical property parameters per unit frequency

位移幅值/mm	频率变化范围/Hz	$\Delta G'$ /MPa	$\Delta G''$ /MPa	$\Delta \eta$	$\Delta E_d/(N \cdot m)$	$\Delta K_e/(kN \cdot m^{-1})$	$\Delta C_e/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$
0.5	0.1~0.5	0.327 3	0.481 5	0.671 0	0.232 8	196.350 0	-191.404 9
	0.5~1.5	0.177 3	0.280 0	0.207 5	0.147 8	106.398 0	-25.583 2
	1.5~2.5	0.168 9	0.231 1	0.098 7	0.116 9	101.358 0	-6.984 9
	2.5~3.5	0.001 4	0.140 3	0.155 0	0.101 3	0.815 3	-5.472 5
1.5	0.1~0.5	0.231 5	0.386 3	0.683 3	1.746 6	138.895 0	-188.737 5
	0.5~1.5	0.156 6	0.223 3	0.219 0	1.094 6	93.968 4	-22.961 8
	1.5~2.5	0.120 5	0.159 6	0.075 4	0.787 8	72.300 3	-7.024 1
	2.5~3.5	0.009 1	0.110 8	0.175 2	0.607 7	5.472 2	-4.343 6
2.5	0.1~0.5	0.230 3	0.347 4	0.623 1	4.203 2	138.147 2	-131.335 4
	0.5~1.5	0.131 1	0.183 1	0.205 9	2.506 2	78.689 2	-19.214 7
	1.5~2.5	0.089 2	0.124 6	0.078 4	1.638 6	53.523 7	-6.079 5
	2.5~3.5	0.004 1	0.070 9	0.174 9	1.084 6	2.478 2	-4.068 9

HDVED 的动态力学性能参数随温度的变化曲线，如图 8 所示。由图 8 可知，在中高温域(5~45 °C)

且低频率加载下，HDVED 具有优异的减震耗能能力和中高温域环境适应能力， $\eta$  峰值可达 1.86，极端

高温 45 °C 的  $\eta$  亦在可达 0.26。 $G'$ 、 $G''$ 、 $\eta$ 、 $E_d$ 、 $K_e$ 、 $C_e$  随着温度的升高而减小。中等温域(5~25 °C)减小速率较大,较高温域下(25~45 °C)减小速率较小。表明 HDVED 在较高的温度下的动态力学性能参数的相对较为稳定。随着位移幅值的增大, $G'$ 、 $G''$ 、 $\eta$ 、 $K_e$ 、 $C_e$  减小速率逐渐减小,但  $E_d$  减小速率逐渐增

大。HDVED 的动态力学性能参数具有较强的温度依赖性。具体表现为,HDVED 动态力学性能参数单位温度的变化量,如表 3 所示。温度和位移幅值对 HDVED 动态力学性能参数的影响具有明显耦合特性。

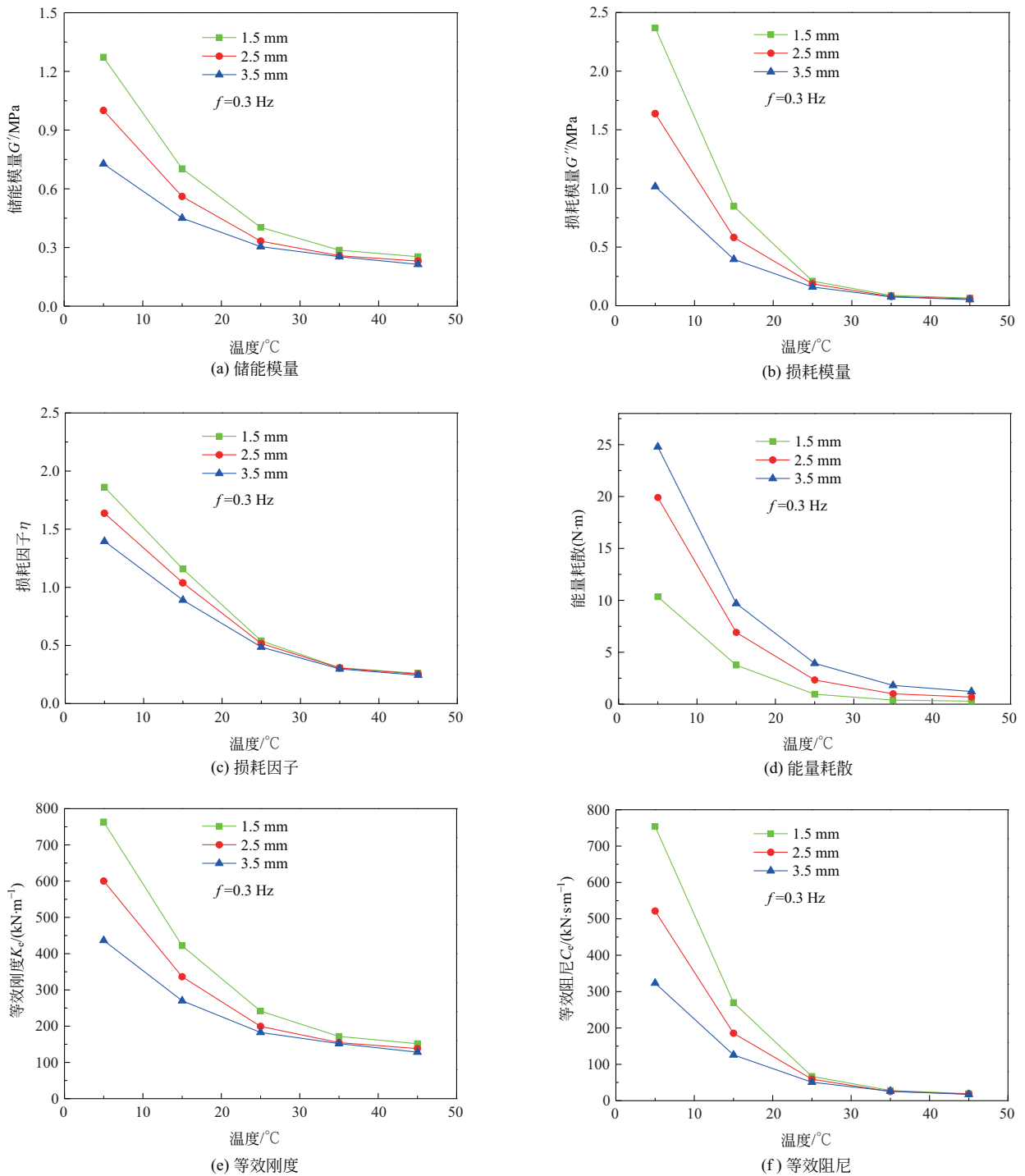


图 8 LHVED 动态力学性能参数随温度的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of LHVED dynamic mechanical property parameters with temperature

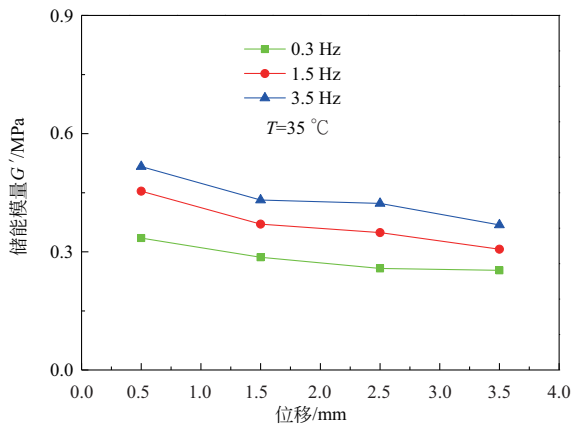
表 3 HDVED 动态力学性能参数单位温度的变化量

Table 3 The changed amount of HDVED dynamic mechanical property parameters per unit temperature

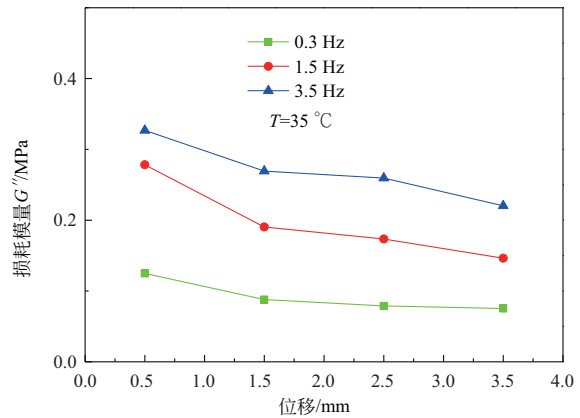
位移幅值/mm	温度变化范围/°C	$\Delta G'$ /MPa	$\Delta G''$ /MPa	$\Delta \eta$	$\Delta E_d/(N \cdot m)$	$\Delta K_e/(kN \cdot m^{-1})$	$\Delta C_e/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$
1.5	5~15	-0.057 0	-0.152 2	-0.070 5	-0.658 4	-34.183 8	-48.431 6
	15~25	-0.030 0	-0.063 8	-0.061 7	-0.279 5	-18.007 6	-20.301 8
	25~35	-0.011 6	-0.012 2	-0.023 3	-0.056 6	-6.983 1	-3.869 0
	35~45	-0.003 3	-0.002 2	-0.004 8	-0.010 4	-2.005 5	-0.869 2
2.5	5~15	-0.044 0	-0.105 6	-0.059 9	-1.298 9	-26.383 4	-33.608 7
	15~25	-0.022 8	-0.039 6	-0.052 2	-0.458 1	-13.698 5	-12.605 0
	25~35	-0.007 5	-0.010 7	-0.021 0	-0.132 9	-4.477 5	-3.406 8
	35~45	-0.002 7	-0.002 1	-0.005 3	-0.031 6	-1.644 4	-0.655 4
3.5	5~15	-0.027 8	-0.062 1	-0.050 6	-1.508 3	-16.657 8	-19.751 0
	15~25	-0.014 6	-0.023 6	-0.040 5	-0.577 1	-8.735 8	-7.497 2
	25~35	-0.005 1	-0.008 4	-0.018 8	-0.211 8	-3.081 9	-2.461 1
	35~45	-0.003 9	-0.002 3	-0.005 4	-0.059 3	-2.349 5	-0.896 3

HDVED 的动态力学性能参数随位移幅值的变化曲线,如图 9 所示。由图 9 可知,在较大位移幅值范围下,HDVED 具有优异的减震耗能能力。 $G'$ 、 $G''$ 、 $\eta$ 、 $K_e$ 、 $C_e$  随着位移幅值的增大而减小,其减小速率逐渐减小。 $E_d$  随着位移幅值的增大而增大,其增大速率逐渐增大。随着频率的增大, $G'$ 、 $G''$ 、 $\eta$ 、 $K_e$  减

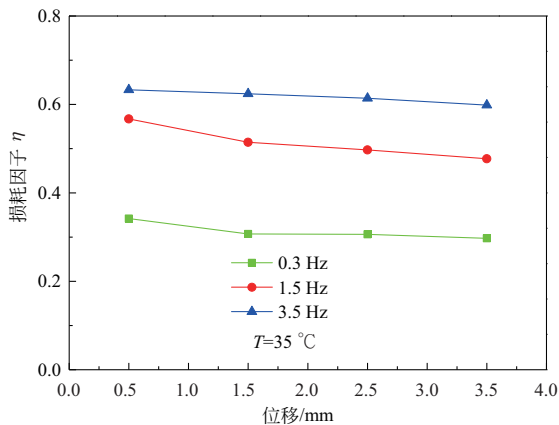
小速率逐渐增大, $C_e$  减小速率逐渐减小, $E_d$  的增大速率逐渐增大。HDVED 的动态力学性能参数具有位移幅值依赖性。具体表现为,HDVED 动态力学性能参数单位位移幅值的变化量,如表 4 所示。位移幅值和激励频率对 HDVED 动态力学性能参数的影响具有明显耦合特性。



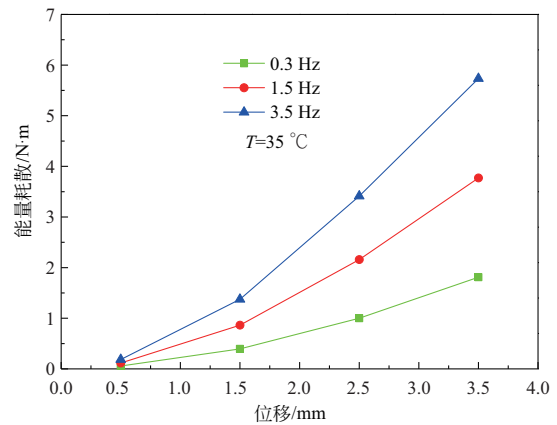
(a) 储能模量



(b) 损耗模量



(c) 损耗因子



(d) 能量耗散

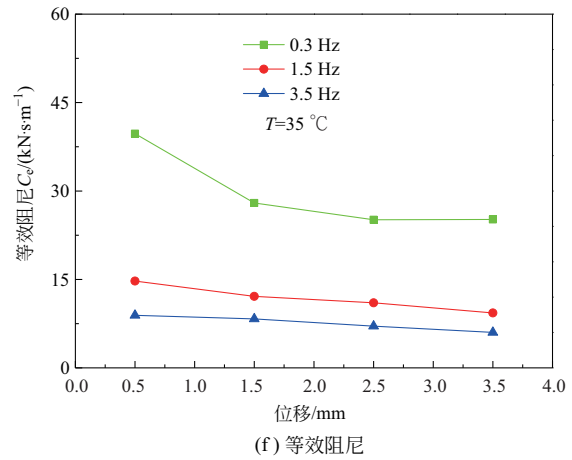
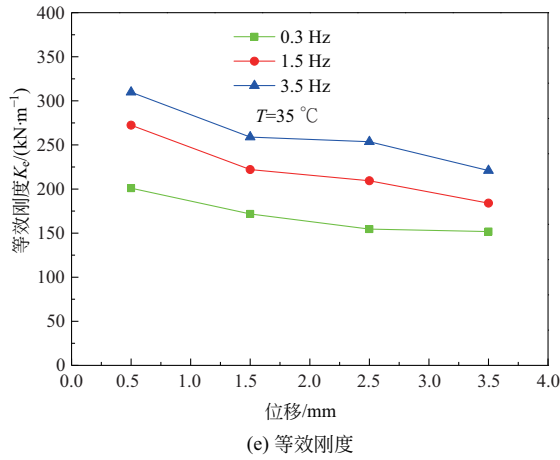


图9 LHVED 动态力学性能参数随位移幅值的变化曲线

Fig.9 Variation curves of LHVED dynamic mechanical property parameters with displacement amplitude

表4 HDVED 动态力学性能参数单位位移幅值的变化量

Table 4 The changed amount of HDVED dynamic mechanical property parameters per unit displacement amplitude

激励频率/Hz	位移幅值变化范围/mm	$\Delta G'$ /MPa	$\Delta G''$ /MPa	$\Delta \eta$	$\Delta E_d/(N \cdot m)$	$\Delta K_e/(kN \cdot m^{-1})$	$\Delta C_e/(kN \cdot s \cdot m^{-1})$
0.3	0.5~1.5	-0.048 8	-0.037 0	-0.034 9	0.338 0	-29.279 5	-11.760 7
	1.5~2.5	-0.028 5	-0.009 0	-0.000 8	0.606 0	-17.102 9	-2.853 2
	2.5~3.5	-0.004 8	-0.003 7	-0.008 9	0.809 6	-2.848 3	0.048 1
1.5	0.5~1.5	-0.083 8	-0.087 9	-0.052 9	0.746 5	-50.253 6	-2.596 2
	1.5~2.5	-0.021 3	-0.017 0	-0.017 4	1.294 2	-12.785 3	-1.083 5
	2.5~3.5	-0.042 3	-0.027 1	-0.019 8	1.612 3	-25.348 9	-1.724 4
3.5	0.5~1.5	-0.084 7	-0.057 5	-0.009 0	1.189 0	-50.847 8	-0.614 5
	1.5~2.5	-0.008 8	-0.009 8	-0.010 1	2.038 1	-5.273 5	-1.221 5
	2.5~3.5	-0.054 5	-0.039 2	-0.015 6	2.321 8	-32.687 0	-1.069 0

## 2 等效内变量高阶分数导数模型研究

上一节中 HDVED 动态力学性能试验可知，激励频率、环境温度和位移幅值对 HDVED 动态力学性能和耗能能力有较大的影响，且耦合效应明显。准确描述 HDVED 力学行为是黏减震结构动力响应分析与设计的关键环节，对 HDVED 的精细化力学模型的研究非常重要且必要。

### 2.1 力学模型的建立

本文采用的高阶分数阶导数模型的核心思想是将传统标准机械模型中的牛顿粘壶单元用 Abel 弹壶单元取代，Abel 弹壶单元兼具弹性和黏性，其可大幅提升模型的准确性和适应性，其应力-应变关系表达式如下：

$$\sigma(t) = E\epsilon^{-1} \cdot \eta^\alpha D^\alpha \epsilon(t) = E\tau^\alpha D^\alpha \epsilon(t) = uD^\alpha \epsilon(t) \quad (8)$$

式中： $E$  为弹性模量； $\eta$  为黏度系数， $\tau = \eta/E$ ，即材

料的松弛时间， $u = E\tau^\alpha$ ， $\sigma$  为应力， $\epsilon$  为应变。

$D^\alpha$  为 Riemann-Liouville 分数阶导数算子，其表达式如下：

$$D^\alpha [f(t)] = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(a)(t-a)^{-\alpha+k}}{\Gamma(1+n-\alpha)} + \frac{1}{\Gamma(1+n-\alpha)} \int_0^t \frac{f^{(n+1)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n}} d\tau \quad (9)$$

式中： $n \leq \alpha < n+1$ ， $n$  为实数； $\Gamma$  为 Gamma 函数：

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt, \text{Re}(z) > 0 \quad (10)$$

当  $n=0$ ，即  $0 < \alpha < 1$ ，式(10)简化为下式：

$$D^\alpha [F(t)] = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^\alpha} d\tau \quad (11)$$

在上述分数阶黏理论的基础上，经过系列推导，可得到高阶分数阶导数 FVMS 模型的应力-应变方程为：

$$\tau(t) + p_1 D^{\alpha_1} [\tau(t)] + p_2 D^{\alpha_2} [\tau(t)] + p_3 D^{\alpha_1 + \alpha_2} [\tau(t)] = q_1 D^{\alpha_1} [\gamma(t)] + q_2 D^{\alpha_1 + \alpha_2} [\gamma(t)] \quad (12)$$

式中:  $p_1 = \frac{\eta_1(E_1+E_2)}{E_1E_2}$ ;  $p_2 = \frac{\eta_2}{E_2}$ ;  $p_3 = \frac{\eta_1\eta_2}{E_1E_2}$ ;  $q_1 = \eta_1$ ;  $q_2 = \frac{\eta_1\eta_2}{E_2}$ ;  $\tau$  为应力;  $\gamma$  为应变。

经傅里叶变换推导可得:

$$G^*(\omega) = \frac{\tau(\omega)}{\gamma(\omega)} = \frac{1}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} \left\{ \begin{aligned} & \left[ p_1q_1\omega^{2\alpha_1} + p_3q_2\omega^{2\alpha_1+2\alpha_2} + q_1\omega^{\alpha_1} \cos \frac{\pi\alpha_1}{2} + (p_3q_1 + p_1q_2)\omega^{2\alpha_1+\alpha_2} \cos \frac{\pi\alpha_2}{2} \right. \\ & \left. + (q_2 + p_2q_1)\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \cos \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} + p_2q_2\omega^{\alpha_1+2\alpha_2} \cos \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \right] \\ & + i \left[ q_1\omega^{\alpha_1} \sin \frac{\pi\alpha_1}{2} + p_2q_2\omega^{\alpha_1+2\alpha_2} \sin \frac{\pi\alpha_1}{2} + (p_1q_2 - p_3q_1)\omega^{2\alpha_1+\alpha_2} \sin \frac{\pi\alpha_2}{2} \right. \\ & \left. + p_2q_1\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \sin \frac{\pi(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} + q_2\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \sin \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{cases} \varphi_1 = 1 + p_1\omega^{\alpha_1} \cos \frac{\pi\alpha_1}{2} + p_2\omega^{\alpha_2} \cos \frac{\pi\alpha_2}{2} + p_3\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \cos \frac{\pi(\alpha_1+\alpha_2)}{2} \\ \varphi_2 = p_1\omega^{\alpha_1} \sin \frac{\pi\alpha_1}{2} + p_2\omega^{\alpha_2} \sin \frac{\pi\alpha_2}{2} + p_3\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \sin \frac{\pi(\alpha_1+\alpha_2)}{2} \end{cases} \quad (14)$$

进一步可以得到该模型储能模量  $G'(\omega)$ , 损耗模量  $G''(\omega)$  和损耗因子  $\eta(\omega)$  如下式:

$$\begin{cases} G'(\omega) = \frac{1}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} \left\{ \begin{aligned} & p_1q_1\omega^{2\alpha_1} + p_3q_2\omega^{2\alpha_1+2\alpha_2} + q_1\omega^{\alpha_1} \cos \frac{\pi\alpha_1}{2} + (p_3q_1 + p_1q_2)\omega^{2\alpha_1+\alpha_2} \cos \frac{\pi\alpha_2}{2} \\ & + (q_2 + p_2q_1)\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \cos \frac{\pi(\alpha_1+\alpha_2)}{2} + p_2q_2\omega^{\alpha_1+2\alpha_2} \cos \frac{\pi(\alpha_1+2\alpha_2)}{2} \end{aligned} \right\} \\ G''(\omega) = \frac{1}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} \left\{ \begin{aligned} & q_1\omega^{\alpha_1} \sin \frac{\pi\alpha_1}{2} + p_2q_2\omega^{\alpha_1+2\alpha_2} \sin \frac{\pi\alpha_1}{2} + (p_1q_2 - p_3q_1)\omega^{2\alpha_1+\alpha_2} \sin \frac{\pi\alpha_2}{2} \\ & + p_2q_1\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \sin \frac{\pi(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} + q_2\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \sin \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \end{aligned} \right\} \\ \eta(\omega) = \frac{G''(\omega)}{G'(\omega)} \end{cases} \quad (15)$$

为了能够考虑 VED 的温度依赖性, 本文引入温-频等效原理<sup>[29-30]</sup>对 VED 的高阶分数导数模型进行修正。其中温-频等效原理表达式为:

$$\begin{cases} G'(\omega, T) = G'(\alpha_T\omega, T_0) \\ G''(\omega, T) = G''(\alpha_T\omega, T_0) \\ \eta(\omega, T) = \eta(\alpha_T\omega, T_0) \\ \alpha_T = 10^{-D_1(T-T_0)/[D_2+(T+T_0)]} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $T$  为温度;  $T_0$  为参考温度;  $\alpha_T$  为温度转换系数;  $D_1$  和  $D_2$  为材料常数。

将式(16)带入模型表达式(15)中, 可得:

$$\begin{cases} G'(\omega, T) = \frac{1}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} \left\{ \begin{aligned} & p_1q_1\alpha_T^{2\alpha_1}\omega^{2\alpha_1} + p_3q_2\alpha_T^{2\alpha_1+2\alpha_2}\omega^{2\alpha_1+2\alpha_2} + q_1\alpha_T^{\alpha_1}\omega^{\alpha_1} \cos \frac{\pi\alpha_1}{2} + (p_3q_1 + p_1q_2)\alpha_T^{2\alpha_1+\alpha_2}\omega^{2\alpha_1+\alpha_2} \cos \frac{\pi\alpha_2}{2} \\ & + (q_2 + p_2q_1)\alpha_T^{\alpha_1+\alpha_2}\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \cos \frac{\pi(\alpha_1+\alpha_2)}{2} + p_2q_2\alpha_T^{\alpha_1+2\alpha_2}\omega^{\alpha_1+2\alpha_2} \cos \frac{\pi(\alpha_1+2\alpha_2)}{2} \end{aligned} \right\} \\ G''(\omega, T) = \frac{1}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} \left\{ \begin{aligned} & q_1\alpha_T^{\alpha_1}\omega^{\alpha_1} \sin \frac{\pi\alpha_1}{2} + p_2q_2\alpha_T^{\alpha_1+2\alpha_2}\omega^{\alpha_1+2\alpha_2} \sin \frac{\pi\alpha_1}{2} + (p_1q_2 - p_3q_1)\alpha_T^{2\alpha_1+\alpha_2}\omega^{2\alpha_1+\alpha_2} \sin \frac{\pi\alpha_2}{2} \\ & + p_2q_1\alpha_T^{\alpha_1+\alpha_2}\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \sin \frac{\pi(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} + q_2\alpha_T^{\alpha_1+\alpha_2}\omega^{\alpha_1+\alpha_2} \sin \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \end{aligned} \right\} \\ \eta(\omega, T) = \frac{G''(\omega, T)}{G'(\omega, T)} \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{其中, } \left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = 1 + p_1 \alpha_T^{\alpha_1} \omega^{\alpha_1} \cos \frac{\pi \alpha_1}{2} + p_2 \alpha_T^{\alpha_2} \omega^{\alpha_2} \cos \frac{\pi \alpha_2}{2} + p_3 \alpha_T^{\alpha_1 + \alpha_2} \omega^{\alpha_1 + \alpha_2} \cos \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \\ \varphi_2 = p_1 \alpha_T^{\alpha_1} \omega^{\alpha_1} \sin \frac{\pi \alpha_1}{2} + p_2 \alpha_T^{\alpha_2} \omega^{\alpha_2} \sin \frac{\pi \alpha_2}{2} + p_3 \alpha_T^{\alpha_1 + \alpha_2} \omega^{\alpha_1 + \alpha_2} \sin \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \\ \alpha_T = 10^{-D_1(T-T_0)/[D_2+(T-T_0)]} \end{array} \right. \quad (18)$$

本文引入热力学内变量理论考虑位移幅值对 VED 力学性能的影响, 其表达式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} D(t) = \lambda(\omega, \Delta\varepsilon)t \\ \lambda(\omega, \Delta\varepsilon) = 1 + 2\phi\omega^\zeta \Delta\varepsilon/\pi \end{array} \right. \quad (19)$$

式中:  $\phi$ 、 $\zeta$  为材料参数;  $\Delta\varepsilon$  为应变;  $\lambda(\omega, \Delta\varepsilon)$  为应变移位因子;  $D(t)$  为内禀时间。

进而推导得到等效内变量高阶分数导数模型表达式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} G'(\omega, T, \varepsilon) = \frac{1}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} \left\{ \begin{array}{l} p_1 q_1 \frac{\alpha_T^{2\alpha_1} \omega^{2\alpha_1}}{\lambda^{2\alpha_1}} + p_3 q_2 \frac{\alpha_T^{2\alpha_1 + 2\alpha_2} \omega^{2\alpha_1 + 2\alpha_2}}{\lambda^{2\alpha_1 + 2\alpha_2}} + q_1 \frac{\alpha_T^{\alpha_1} \omega^{\alpha_1}}{\lambda^{\alpha_1}} \cos \frac{\pi \alpha_1}{2} + (p_3 q_1 + p_1 q_2) \frac{\alpha_T^{2\alpha_1 + \alpha_2} \omega^{2\alpha_1 + \alpha_2}}{\lambda^{2\alpha_1 + \alpha_2}} \cos \frac{\pi \alpha_2}{2} \\ + (q_2 + p_2 q_1) \frac{\alpha_T^{\alpha_1 + \alpha_2} \omega^{\alpha_1 + \alpha_2}}{\lambda^{\alpha_1 + \alpha_2}} \cos \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} + p_2 q_2 \frac{\alpha_T^{\alpha_1 + 2\alpha_2} \omega^{\alpha_1 + 2\alpha_2}}{\lambda^{\alpha_1 + 2\alpha_2}} \cos \frac{\pi(\alpha_1 + 2\alpha_2)}{2} \end{array} \right\} \\ G''(\omega, T, \varepsilon) = \frac{1}{\varphi_1^2 + \varphi_2^2} \left\{ \begin{array}{l} q_1 \frac{\alpha_T^{\alpha_1} \omega^{\alpha_1}}{\lambda^{\alpha_1}} \sin \frac{\pi \alpha_1}{2} + p_2 q_2 \frac{\alpha_T^{\alpha_1 + 2\alpha_2} \omega^{\alpha_1 + 2\alpha_2}}{\lambda^{\alpha_1 + 2\alpha_2}} \sin \frac{\pi \alpha_1}{2} + (p_1 q_2 - p_3 q_1) \frac{\alpha_T^{2\alpha_1 + \alpha_2} \omega^{2\alpha_1 + \alpha_2}}{\lambda^{2\alpha_1 + \alpha_2}} \sin \frac{\pi \alpha_2}{2} \\ + p_2 q_1 \frac{\alpha_T^{\alpha_1 + \alpha_2} \omega^{\alpha_1 + \alpha_2}}{\lambda^{\alpha_1 + \alpha_2}} \sin \frac{\pi(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} + q_2 \frac{\alpha_T^{\alpha_1 + \alpha_2} \omega^{\alpha_1 + \alpha_2}}{\lambda^{\alpha_1 + \alpha_2}} \sin \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \end{array} \right\} \\ \eta(\omega, T, \varepsilon) = \frac{G''(\omega, T, \varepsilon)}{G'(\omega, T, \varepsilon)} \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\text{其中, } \left\{ \begin{array}{l} \varphi_1 = 1 + p_1 \frac{\alpha_T^{\alpha_1} \omega^{\alpha_1}}{\lambda^{\alpha_1}} \cos \frac{\pi \alpha_1}{2} + p_2 \frac{\alpha_T^{\alpha_2} \omega^{\alpha_2}}{\lambda^{\alpha_2}} \cos \frac{\pi \alpha_2}{2} + p_3 \frac{\alpha_T^{\alpha_1 + \alpha_2} \omega^{\alpha_1 + \alpha_2}}{\lambda^{\alpha_1 + \alpha_2}} \cos \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \\ \varphi_2 = p_1 \frac{\alpha_T^{\alpha_1} \omega^{\alpha_1}}{\lambda^{\alpha_1}} \sin \frac{\pi \alpha_1}{2} + p_2 \frac{\alpha_T^{\alpha_2} \omega^{\alpha_2}}{\lambda^{\alpha_2}} \sin \frac{\pi \alpha_2}{2} + p_3 \frac{\alpha_T^{\alpha_1 + \alpha_2} \omega^{\alpha_1 + \alpha_2}}{\lambda^{\alpha_1 + \alpha_2}} \sin \frac{\pi(\alpha_1 + \alpha_2)}{2} \\ \alpha^T = 10^{-D_1(T-T_0)/[D_2+(T-T_0)]} \\ \lambda = 1 + 2\phi\omega^\zeta \Delta\varepsilon/\pi \end{array} \right. \quad (21)$$

式(20)为 HDVED 的等效内变量高阶分数导数模型, 该模型各参数物理意义明确, 模型能够综合描述激励频率、环境温度和位移幅值对 HDVED 动态力学性能的影响, 可为黏减震结构设计与动力响应分析的提供重要基础。

## 2.2 模型的试验验证

为了验证上节所提出 HDVED 的等效内变量高阶分数导数模型的准确性和有效性, 此处采用上节中 HDVED 的多种工况的试验数据与模型计算得到的数值结果进行对比分析。随机选取部分工况的试验结果对模型中各待定参数进行拟合。本节基于遗传算法, 编制相应程序确定待定参数:  $p_1 = 11.627$ 、 $p_2 = 4.380$ 、 $p_3 = 0.742$ 、 $q_1 = 3.166$ 、 $q_2 = 22.904$ 、 $\alpha_1 = 0.167$ 、 $\alpha_2 = 0.559$ 、 $T_0 = 20.760$ 、 $D_1 = 3.706$ 、 $D_2 =$

31.188、 $\phi = 1.505 \times 10^{-6}$ 、 $\zeta = 11.509$ , 如表 5 所示。在此基础上, 利用所提出的力学模型预测 HDVED 的动态力学性能, 并与未参与待定参数确定的一部分试验结果进行对比分析, 以验证该模型的准确性和有效性。表 5 为所提出的等效内变量高阶分数导数模型的数值计算结果与试验值结果的误差统计。由表 5 可知, 在不同频率、温度和位移幅值下, HDVED 的  $G'$ 、 $G''$  和  $\eta$  数值计算结果与试验结果吻合良好。具体表现为, 各工况  $G'$ 、 $G''$  和  $\eta$  的误差基本在 10% 以下。 $G'$  误差平均值为 3.85%, 标准差为 0.034;  $G''$  误差平均值为 4.01%, 方差为 0.029;  $\eta$  误差平均值为 5.65%, 方差为 0.041。 $G'$ 、 $G''$  和  $\eta$  误差平均值和标准差均很小, 验证了本文所提出模型的准确性与稳定性。

表 5 模型的数值计算结果与试验值结果的误差统计

Table 5 Error statistics of numerical calculation results and experimental results of models

温度/°C	频率/Hz	位移幅值/mm	储能模量 $G'$ /MPa		损耗模量 $G''$ /MPa		损耗因子 $\eta$	
			模型计算值	误差	模型计算值	误差	模型计算值	误差
25	0.1	2.5	0.294	5.73%	0.108	4.24%	0.367	1.40%
25	0.5	2.5	0.387	4.56%	0.243	0.35%	0.628	1.14%
25	1.5	2.5	0.491	2.14%	0.416	2.35%	0.847	2.37%
25	2.5	2.5	0.551	6.74%	0.526	4.41%	0.954	5.42%
5	0.3	1.5	1.272	0.00%	2.371	0.11%	1.864	0.11%
15	0.3	1.5	0.701	0.17%	0.847	0.00%	1.208	4.40%
25	0.3	1.5	0.371	7.72%	0.219	4.50%	0.589	9.05%
35	0.3	1.5	0.284	0.63%	0.095	8.11%	0.334	8.80%
45	0.3	1.5	0.253	0.00%	0.060	7.92%	0.239	7.92%
35	0.3	0.5	0.302	9.95%	0.118	5.65%	0.390	14.16%
35	0.3	1.5	0.284	0.63%	0.095	8.11%	0.334	8.80%
35	0.5	2.5	0.274	6.34%	0.082	3.91%	0.299	2.29%
35	0.5	3.5	0.267	5.51%	0.073	2.44%	0.275	7.54%

HDVED 的滞回曲线的数值计算结果与试验值结果，如图 10~图 12 所示。由图可知，在不同频率、温度和位移幅值三个维度下，模型计算与试验的滞

回曲线均吻合良好，表明所提出的等效内变量高阶分数导数模型能够准确的预测 HDVED 力-位移之间的对应关系。

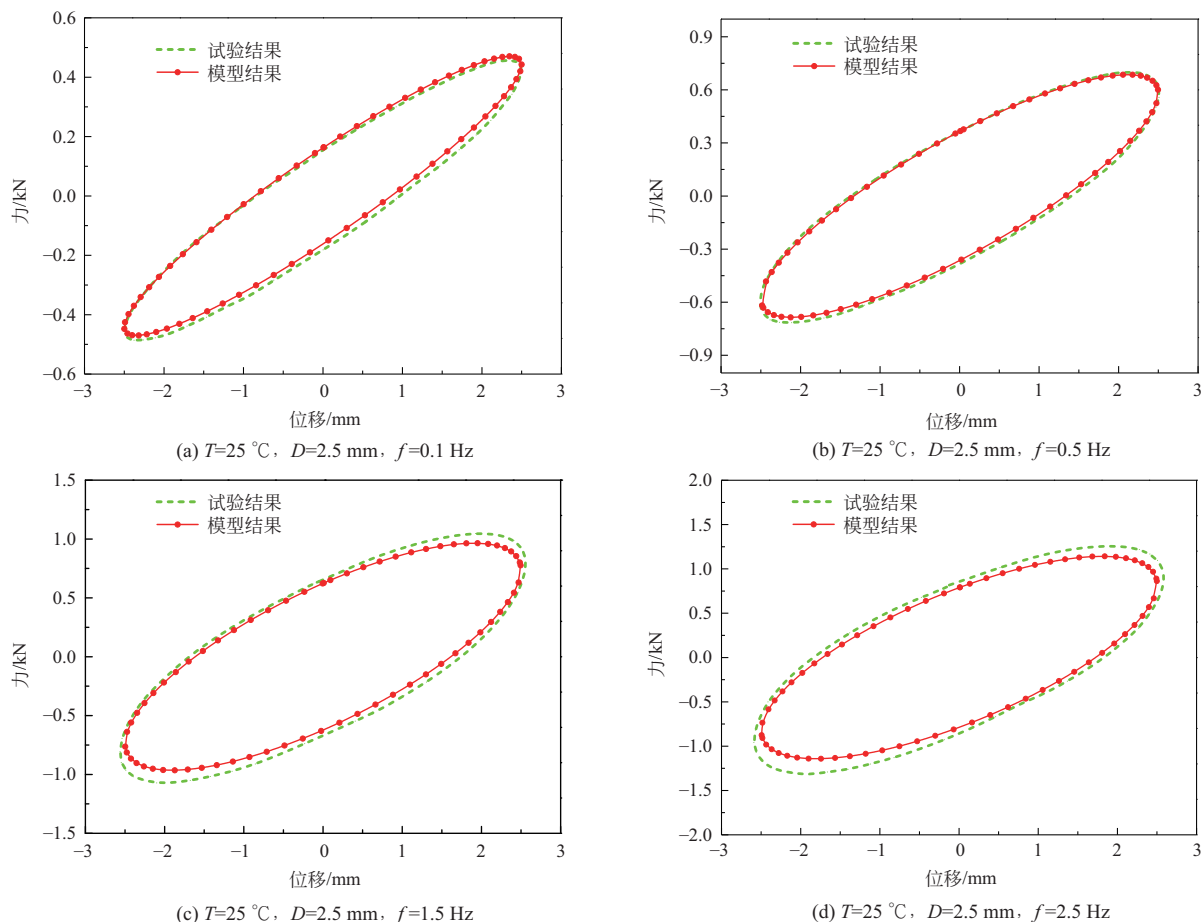
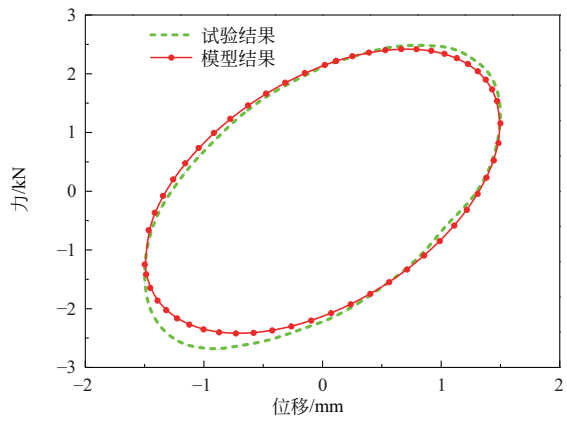
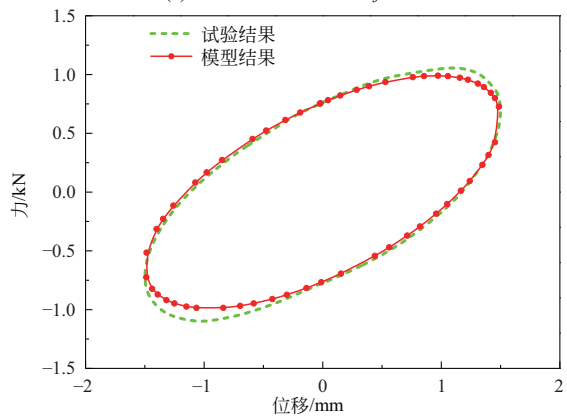


图 10 不同频率下模型与试验滞回曲线对比

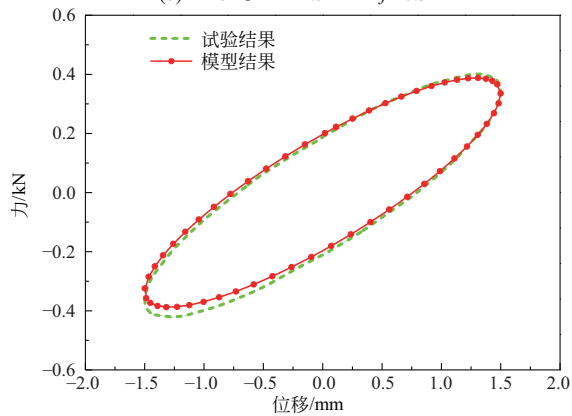
Fig. 10 Comparison of hysteresis curves between the model and the test at different frequencies



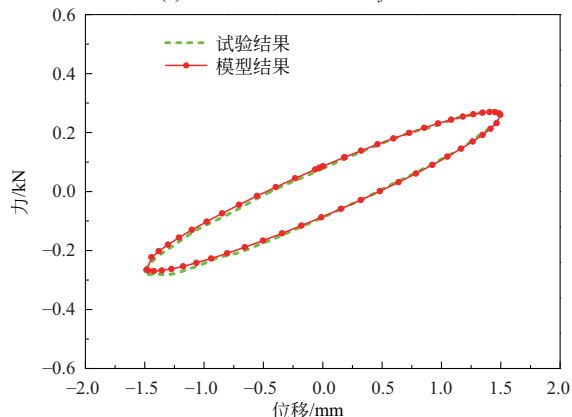
(a)  $T=5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D=1.5\text{ mm}$ ,  $f=0.3\text{ Hz}$



(b)  $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D=1.5\text{ mm}$ ,  $f=0.3\text{ Hz}$



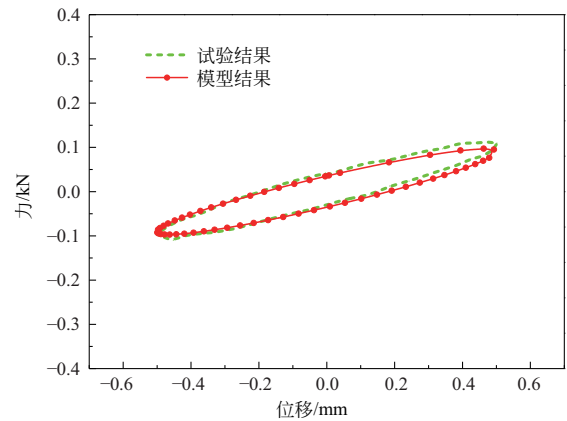
(c)  $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D=1.5\text{ mm}$ ,  $f=0.3\text{ Hz}$



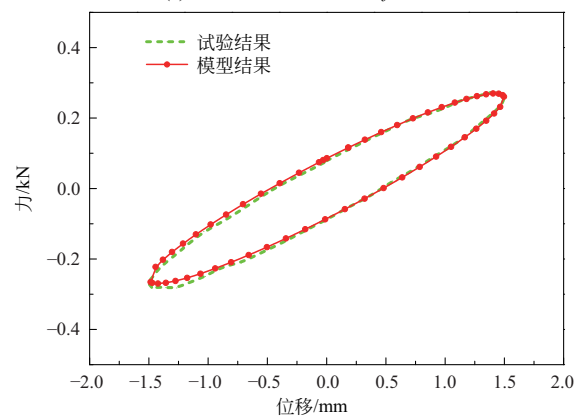
(d)  $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D=1.5\text{ mm}$ ,  $f=0.3\text{ Hz}$

图 11 不同温度下模型与试验滞回曲线对比

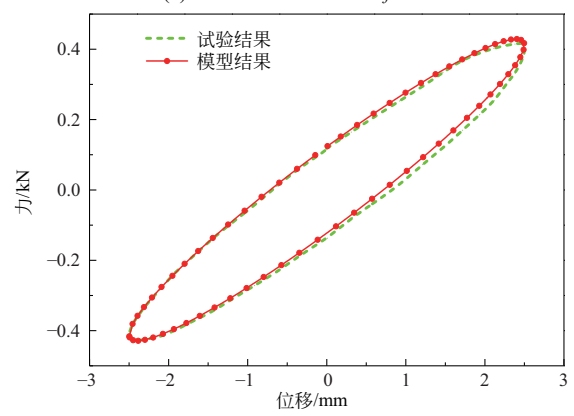
Fig. 11 Comparison of hysteresis curves between the model and the test at different temperatures



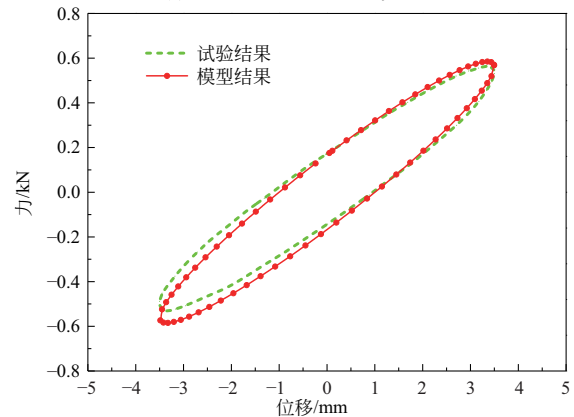
(a)  $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D=0.5\text{ mm}$ ,  $f=0.3\text{ Hz}$



(b)  $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D=1.5\text{ mm}$ ,  $f=0.3\text{ Hz}$



(c)  $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D=2.5\text{ mm}$ ,  $f=0.3\text{ Hz}$



(d)  $T=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $D=3.5\text{ mm}$ ,  $f=0.3\text{ Hz}$

图 12 不同位移幅值下模型与试验滞回曲线对比

Fig. 12 Comparison of hysteresis curves between the model and the test at different displacement amplitudes

综上所述,本文所提出的等效内变量高阶分数导数模型具有较好的预测能力,能够较准确的预测频率、温度和位移幅值对 HDVED 动态力学性能的影响。

### 3 结 论

本文在不同频率、温度和位移幅值下对自主研制的 HDVED 进行动态力学性能试验。研究了频率、温度和位移幅值对 HDVED 力学特性和减震耗能性能的影响规律。在此基础上,提出 HDVED 的等效内变量高阶分数导数模型,并对该模型的有效性和准确性进行试验验证。主要结论如下:

(1) 自主研制的 HDVED 滞回曲线均为比较饱满的椭圆,实现了 HDVED 低频率激励下具有优异的减震耗能能力。同时在中高温域且低频率加载下表现出优异的减震耗能能力和环境适应能力,损耗因子峰值可达 1.86。可有效解决 VED 在土木工程中的中高温域环境服役且在地震作用下低频减震控制的关键问题。

(2) HDVED 力学特性和减震耗能性能具有较强的频率依赖性、温度依赖性和位移幅值依赖性。储能模量、损耗模量、损耗因子、单圈耗能、等效刚度随着激励频率的增大而增大,其增大速率逐渐减小,但等效阻尼随着频率的增大而减小,其减小速率逐渐减小。储能模量、损耗模量、损耗因子、单圈耗能、等效刚度和等效阻尼随着温度的升高而减小,中等温域减小速率较大,较高温域减小速率较小。储能模量、损耗模量、损耗因子、等效刚度和等效阻尼随着位移幅值的增大而减小,其减小速率逐渐减小。单圈耗能随着位移幅值的增大而增大,其增大速率逐渐减小。

(3) 频率、温度和位移幅值对 HDVED 力学特性和减震耗能性能的影响具有明显耦合特性。随着位移幅值的增大,储能模量、损耗模量、损耗因子、等效刚度随频率的增大速率逐渐减小,单圈耗能随频率的增大速率逐渐增大,等效阻尼随频率的减小速率逐渐减小。随着激励频率的增大,储能模量、损耗模量、损耗因子、单圈耗能、等效刚度随温度的减小速率逐渐增大,但等效阻尼随温度的减小速率逐渐减小。随着频率的增大,储能模量、损耗模量、损耗因子、等效刚度随位移幅值的减小速率逐渐增大,等效阻尼随位移幅值的减小速率逐渐减小,单圈耗能随位移幅值的增大速率逐渐增大。

(4) 所提出的等效内变量高阶分数导数模型能够综合描述激励频率、环境温度和位移幅值对 HDVED

动态力学性能的影响。该模型能够较准确地预测在不同频率、温度和位移幅值下 HDVED 的力学性能。可为黏减震结构动力响应分析与设计提供重要基础。

### 参 考 文 献

- [1] 王良平,张超,邓雪松,等.扇形铅黏弹性阻尼器加固 RC 框架的抗震性能试验研究[J].土木工程学报,2016,49(10):41-48.(WANG Genping, ZHANG Chao, DENG Xuesong, et al. Experimental study on seismic performance of RC frame retrofitted with sector lead viscoelastic dampers[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 41-48. (in Chinese))
- [2] CASTALDO P, DE IULIIS M. Optimal integrated seismic design of structural and viscoelastic bracing-damper systems [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(12): 1809-1827.
- [3] DONG Y R, XU Z D, LI Q Q, et al. Seismic behavior and damage evolution for retrofitted RC frames using haunch viscoelastic damping braces [J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109583.
- [4] 李宏男,李元龙,黄宙,等.新型旋转放大式黏弹性阻尼器性能试验研究[J].工程力学,2021,38(2):134-145.(LI Hongnan, LI Yuanlong, HUANG Zhou, et al. Experimental study on the properties of a new rotation-magnified viscoelastic damper[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(2): 134-145. (in Chinese))
- [5] 周云,李家乐,钟根全,等.钢管叠层黏弹性阻尼器性能研究[J].土木工程学报,2023,56(10):1-10.(ZHOU Yun, LI Jiale, ZHONG Genquan, et al. Research on properties of laminated viscoelastic body filled steel tube damper[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(10): 1-10. (in Chinese))
- [6] DONG Y R, XU Z D, LI Q Q, et al. Design parameters and material-scale damage evolution of seismic upgraded RC frames by viscoelastic haunch bracing-dampers [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(5): 1476-1491.
- [7] DALL'ASTA A, RAGNI L. Experimental tests and analytical model of high damping rubber dissipating devices [J]. Engineering Structures, 2006, 28(13): 1874-1884.
- [8] PALMERI A, MUSCOLINO G. A numerical method for the time-domain dynamic analysis of buildings equipped with viscoelastic dampers [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2011, 18(5): 519-539.
- [9] MEHRABI M H, SUHATRIL M, IBRAHIM Z, et al. Modeling of a viscoelastic damper and its application in structural control[J]. PLoS One, 2017, 12(6): e0176480.
- [10] LEWANDOWSKI R. Influence of temperature on the dynamic characteristics of structures with viscoelastic dampers [J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(2): 04018245.
- [11] XIANG Y, XIE H R. Probabilistic effectiveness of viscoelastic dampers considering earthquake excitation uncertainty and ambient temperature fluctuation [J]. Engineering Structures, 2021, 226: 111379.
- [12] ESKANDARI NASAB M S, KIM J. Fuzzy analysis of a viscoelastic damper in seismic retrofit of structures [J].

- Engineering Structures, 2022, 250: 113473.
- [13] 赵刚, 潘鹏, 钱稼茹, 等. 黏弹性阻尼器大变形性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 126-133. (ZHAO Gang, PAN Peng, QIAN Jiaru, et al. Experimental study of viscoelastic dampers subjected to large deformation [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10): 126-133.(in Chinese))
- [14] 周颖, 龚顺明, 吕西林. 带黏弹性阻尼器钢结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 1-10. (ZHOU Ying, GONG Shunming, LU Xilin. Study on shaking table test of a steel structure with additional viscoelastic dampers [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 1-10.(in Chinese))
- [15] 许俊红, 李爱群. 黏弹性阻尼墙减震钢框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 19-26. (XU Junhong, LI Aiqun. Shaking table test of steel frame with added viscoelastic damping wall [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 19-26.(in Chinese))
- [16] 周云, 松本達治, 田中和宏, 等. 新型高阻尼黏弹性阻尼器性能试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(7): 92-99, 115. (ZHOU Yun, Matsumoto Tatsuji, Tanaka Kazuhiro, et al. Research on experimental properties of novel high damping viscoelastic dampers [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(7): 92-99, 115.(in Chinese))
- [17] 王玉璋, 潘鹏, 邓开来, 等. 高阻尼黏弹性橡胶连梁阻尼器力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(3): 158-163. (WANG Yuzhang, PAN Peng, DENG Kailai, et al. Experimental study on high-damping viscoelastic rubber coupling beam damper [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(3): 158-163.(in Chinese))
- [18] 王道航, 潘文, 周娴, 等. 黏弹性叠层复合材料阻尼器性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(16): 254-260. (WANG Daohang, PAN Wen, ZHOU Xian, et al. A study on experimental properties of viscoelastic laminated composite dampers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(16): 254-260.(in Chinese))
- [19] 董尧荣. 粘弹性减震混凝土框架结构强震损伤机制与混合试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2021. (DONG Yaorong. Study on strong-earthquake damage mechanism and hybrid test of the viscoelastic damping concrete frame structures [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese))
- [20] 董尧荣, 徐赵东, 郭迎庆, 等. 宽温域环境下黏弹性减震框架结构混合试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(3): 21-28. (DONG Yaorong, XU Zhaodong, GUO Yingqing, et al. Study on hybrid test of viscoelastic damping frame structures under broad temperature domain [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(3): 21-28. (in Chinese))
- [21] XU Z D, LIAO Y X, GE T, et al. Experimental and theoretical study of viscoelastic dampers with different matrix rubbers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 142(8): 04016051.
- [22] 赵永玲, 侯之超. 基于分数导数的橡胶材料两种粘弹性本构模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2013, 53(3): 378-383. (ZHAO Yongling, HOU Zhichao. Two viscoelastic constitutive models of rubber materials using fractional derivations [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2013, 53(3): 378-383. (in Chinese))
- [23] LAKES R. Viscoelastic Materials [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- [24] PARK S W. Analytical modeling of viscoelastic dampers for structural and vibration control [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(44/45): 8065-8092.
- [25] NASAB M S E, KIM J. Seismic retrofit of structures using hybrid steel slit - viscoelastic dampers [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(11): 04020238.
- [26] WEI W, YUAN Y, IGARASHI A, et al. Generalized hyper-viscoelastic modeling and experimental characterization of unfilled and carbon black filled natural rubber for civil structural applications [J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119211.
- [27] SINGH M P, CHANG T S. Seismic analysis of structures with viscoelastic dampers [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(6): 571-580.
- [28] 黄兴淮, 张一, 李奉南, 等. 黏弹性装配式减震器的性能试验研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2020, 53(4): 405-410. (HUANG Xinghuai, ZHANG Yi, LI Fengnan, et al. Experimental performance study of viscoelastic assembly damper [J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2020, 53(4): 405-410.(in Chinese))
- [29] XU Z D, WANG D X, SHI C F. Model, tests and application design for viscoelastic dampers [J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(9): 1359-1370.
- [30] YEOH O H. Characterization of elastic properties of carbon-black-filled rubber vulcanizates [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1990, 63(5): 792-805.

董尧荣(1988—),男,博士,副教授。主要从事高性能减隔震控制技术、先进混合试验方法与装备等方面研究。

徐赵东(1975—),男,博士,教授。主要从事结构抗震与振动控制、结构健康监测、智能材料与结构等方面研究。

朱丽华(1979—),男,博士,教授。主要从事工程结构减隔震与智能控制、工业建筑结构振动分析与控制等方面研究。

李强强(1992—),男,博士研究生。主要从事黏弹性阻尼减震技术、智能减振材料力学性能与耐久性等方面研究。

成羽(1990—),女,博士,讲师。主要从事(超)高层建筑结构、工程结构减隔震控制等方面研究。

田耘(1994—),男,博士研究生。主要从事磁流变材料阻尼减震技术、智能减振材料力学性能与耐久性等方面研究。