

文章编号: 1000-4750(2018)03-0178-08

新型多维形状记忆合金阻尼器的试验研究

孙 彤¹, 李宏男^{1,2}

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 沈阳 110168; 2. 大连理工大学建设工程学部, 大连 116024)

摘 要: 利用形状记忆合金设计了一种新型多维 SMA 阻尼器, 该阻尼器能够将扭转运动转化为阻尼丝拉伸, 从而提供拉压及扭转方向阻尼, 该文详细介绍了该装置的构造及工作原理。试验研究了加载幅值、加载频率和初始应变对该阻尼器力学性能的影响, 并采用改进的 Graesser-Cozzarelli 模型建立了阻尼器的理论模型, 分别对其拉伸和扭转力学性能进行了数值模拟。结果表明, 不同工况下的数值模拟结果与试验结果均吻合较好, 验证了理论模型的有效性。

关键词: 消能减震; 结构振动控制; 阻尼器; 形状记忆合金; 超弹性

中图分类号: TB535.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.11.0928

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AN INNOVATIVE MULTIDIMENSIONAL SMA DAMPER

SUN Tong¹, LI Hong-nan^{1,2}

(1. Shenyang Jianzhu University, Department of Civil Engineering, Shenyang 110168, China;

2. Dalian University of Technology, Department of Construction Engineering, Dalian 116024, China)

Abstract: An innovative multidimensional shape memory alloy (SMA) damper is developed based on shape memory alloy, which can produce axial and torsional damping by converting torsional deformation to stretching of SMA wires. Construction and the working principle of the device are introduced in detail. Cyclic loading test was carried out to study the influence of loading amplitudes, loading frequency and initial strain on the performance of the damper. To simulate the mechanical property of the damper, a theoretical model of the damper was established based on improved Graesser-Cozzarelli constitutive model. The results of numerical simulation are in good agreement with experimental data, which verified the validity of the prediction model.

Key words: energy dissipation; structural seismic control; damper; shape memory alloys; superelasticity

随着现代结构系统对适应性、可靠性和经济性要求的增长, 智能材料在工程中的应用受到越来越多关注。智能材料的应用能够简化设计, 减少材料使用以及降低加工难度。形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)就是其中具有代表性的一种, 其独特的形状记忆效应和超弹性使得 SMA 在结构控制中有广泛应用。

国内外学者对 SMA 在被动控制方面的应用做

了大量研究。Kari 等^[1]提出一种由 SMA 支撑和屈曲约束支撑构成的双支撑系统, 该系统能够有效降低钢结构层间位移和残余变形。Dieng 等^[2]用直径 2.5 mm 的 NiTi 合金丝设计了一种 SMA 阻尼器, 并对 50 m 长的斜拉索进行控制试验, 结果表明该阻尼器能够降低位移幅值 75%。Asgarian 等^[3]提出一种新型自复位混合阻尼器, 对一五层受控结构的非线性时程分析结果表明, 该阻尼器能够有效控制结

收稿日期: 2016-11-28; 修改日期: 2017-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51261120375); 辽宁省高等学校基本科研项目(LJZ2017040)

通讯作者: 李宏男(1957—), 男, 沈阳人, 教授, 博士, 长江学者, 沈阳建筑大学副校长, 从事结构振动控制研究(E-mail: hnli@dlut.edu.cn).

作者简介: 孙 彤(1986—), 男, 大连人, 讲师, 博士, 从事结构振动控制研究(E-mail: suntong009@mail.dlut.edu.cn).

构的屋顶加速度、层间位移和塑性变形。Adachi 等^[4]开发了一种 SMA 阻尼装置,能够利用其虚拟屈服效应吸收地震能量。李宏男等^[5]研制了筒式 SMA 阻尼器和摩擦-SMA 混合型阻尼器。李惠等^[6]提出了剪刀型阻尼器,能够放大 SMA 的输出力。任文杰等^[7]研究了 SMA 阻尼器控制下的单自由度结构在地震激励下的平稳随机振动。崔迪等^[8]用 SMA 绞线代替混凝土梁主筋,对比了 SMA 混凝土梁与普通混凝土梁的力学性能,结果表明 SMA 混凝土梁的承载、耗能及自修复能力均有明显优势。

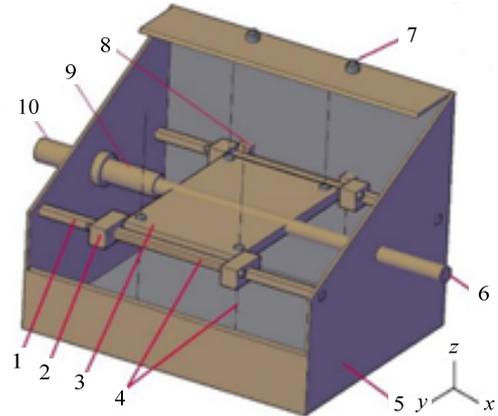
修复历史建筑是 SMA 已有的实际工程应用之一,因为 SMA 加固所需体积较小,能够最大限度降低对历史建筑的损害,同时又能够提供较大强度和变形,保证加固效果。Indirli 等^[9]用一种基于 SMA 的阻尼器修复意大利的一座古代钟楼,该阻尼器含有 60 根直径 1 mm 长度 300 mm 的 NiTi 丝。Alsaleh 等^[10]利用 SMA 进行了清真寺宣礼塔的修复试验,使用 3.5 mm 直径的 SMA 丝对 1:16 的宣礼塔模型进行加固。

可以看出,目前的 SMA 阻尼器主要集中在提供一维拉压阻尼。本文提出了一种新型多维 SMA 阻尼器,该阻尼器结构简单,传力可靠,不但具有良好的耗能能力和自复位能力,还能提供扭转阻尼。通过试验研究了该阻尼器在周期荷载作用下的力学性能,考察了不同加载频率、不同初始应变和不同位移幅值对其力学性能的影响。建立了阻尼器理论模型,通过对比 SIMULINK 模拟结果与试验结果,验证了理论模型的准确性和有效性。

1 多维 SMA 阻尼器的设计

1.1 阻尼器构造

多维 SMA 阻尼器构造如图 1 所示,由导轨、滑块、刚性板、奥氏体 SMA 丝、外壳、中心转轴、调节螺栓、固定挡块、定向套管和连接杆组成。刚性板和中心转轴位于外壳的中部,二者固定连接共同运动,刚性板边缘与外壳上下由垂直 SMA 丝连接。在刚性板两侧设置定向导轨,滑块可以在定向导轨上前后滑动,两个滑块之间由奥氏体 SMA 丝连接。固定挡块与外壳牢固连接,阻挡滑块向中心方向移动。连接杆与外壳固定连接,定向套管和外壳开洞在同一水平轴上,确保中心转轴能够沿该轴平移。每根 SMA 丝都由调节螺栓固定,可根据实际需求调节 SMA 丝初始应力。



1. 定向导轨; 2. 滑块; 3. 刚性板; 4. SMA 丝;
5. 外壳; 6. 中心转轴; 7. 调节螺栓;
8. 固定挡块; 9. 定向套管; 10. 连接杆

图 1 多维 SMA 阻尼器结构图

Fig.1 Diagram of multidimensional SMA damper

需要注意的是:第一,刚性板的宽度决定抵抗扭矩的阻力臂,增大宽度可以获得较大抗扭矩,但会减小转角行程,故应根据实际情况选取尺寸;第二,阻尼丝的预拉伸越大其刚度越大,但会减小变形能力,故应根据实际需求决定预拉伸;第三,当多维形状记忆合金阻尼器安装在结构上时需要在安装处预装钢板,以便阻尼器的固定。

1.2 工作原理

中心转轴沿 x 轴运动时,刚性板带动滑块运动,而另一端滑块被固定挡块阻挡,从而使 SMA 丝拉伸;中心转轴扭转时,刚性板随之转动,抗扭转 SMA 丝受到拉伸。外力卸载后,SMA 的超弹性提供恢复力会带动刚性板回复原位,如此循环往复,消耗能量,提供阻尼。

1.3 功能特点

本实施例中的多维形状记忆合金阻尼器属于被动控制装置范畴,利用 SMA 阻尼丝在外部荷载作用下变形行为实现减振作用,除了具有被动控制的简单、经济、易于实施等优点外,还有以下特点:

- 1) SMA 超弹性使得阻尼器具有自复位能力;
- 2) 可通过增加 SMA 阻尼丝方便调整力学性能,能够提供强大耗能能力;
- 3) 位移过大时 SMA 刚度增加,能够限制位移进一步扩大;
- 4) 可通过调节螺栓方便调节 SMA 初始应力,以满足不同性能需求;
- 5) 抗疲劳和耐腐蚀能力较强。

2 性能试验

2.1 试验概况

为研究阻尼器性能,制作了多维 SMA 阻尼器模型,并对其进行了拉伸和扭转试验。阻尼器模型尺寸为 280 mm×150 mm×150 mm,最大位移为 10 mm。阻尼丝采用超弹性 NiTi 丝,直径 0.55 mm,单根有效长度 100 mm,轴向安装 4 根,抗扭转阻尼丝 8 根。为达到稳定性能,安装前所有 SMA 丝均在 20℃室温下,以 0.01 Hz 加载频率,6 mm 加载幅值的荷载循环训练 50 个周期。拉伸试验在大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室 MTS 试验机上进行,试验装置如图 2 所示。试验过程由计算机控制,力和位移数据由设备自动采集。试验激励采用正弦波,位移控制。试验过程如下:

1) 初始变形为 0.5 mm(应变 0.5%),加载频率分别为 0.01 Hz、0.05 Hz、0.1 Hz 和 0.5 Hz。

保持初始变形不变,每个加载频率分别使用加载幅值 2 mm、3 mm、4 mm 和 5 mm,重复试验;

2) 加载频率为 0.05 Hz,初始变形分别取 0 mm(应变 0%)、1 mm(应变 1%)、2 mm(应变 2%)和 4 mm(应变 4%),每个初始变形分别取激励幅值 2 mm、3 mm 和 4 mm,重复试验。



图 2 多维 SMA 阻尼器拉伸试验

Fig.2 Tension experimental setup of multidimensional SMA damper

扭转试验为拟静力试验,小幅加载,读数稳定后记录。使用 WIZTANK 公司的 WEC4-200BN 型扭矩扳手完成,该扳手误差在 0.2%以内。试验设置如图 3 所示,试验过程中保证阻尼器外壳没有离开桌面,从而确保测得扭矩为阻尼器准确扭矩。



图 3 多维 SMA 阻尼器扭转试验

Fig.3 Torsion experimental setup of multidimensional SMA damper

2.2 指标设置

为了考察不同工况下 SMA 阻尼器的力学性能,设置以下指标^[11]:

1) 单次循环消耗能量 W ,即取一次加载卸载滞回曲线所围成闭环的面积,用于考察多维 SMA 阻尼器的耗能能力。

2) 割线刚度,即取一次滞回中最大和最小出力点,计算线性刚度,如下式所示:

$$K = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (1)$$

式中: F_{\max} 和 F_{\min} 分别表示一次滞回中最大和最小的力; D_{\max} 和 D_{\min} 分别表示 F_{\max} 和 F_{\min} 对应的位移。

3) 等效阻尼比 ξ ,表征阻尼器的阻尼性能,表达式为:

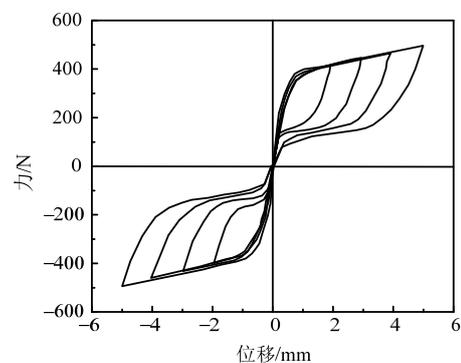
$$\xi = \frac{W}{4\pi W_E} = \frac{W}{2\pi K D^2} \quad (2)$$

其中: W_E 为总应变能; D 为位移幅值。

2.3 试验结果及分析

图 4 给出了室温 20℃,初始变形 0.5 mm 时,不同加载频率和不同加载幅值下阻尼器的滞回曲线。不难看出,相同加载频率、相同初始变形的条件下,阻尼器的耗能能力随加载幅值增加而增大。相同加载幅值时,阻尼器每循环耗散能量随加载频率增加而降低。这是由于循环加载的动能会有一部分转化为 SMA 丝内能,导致 SMA 丝温度升高。加载过程中, SMA 中奥氏体转变为马氏体需要放热,高频加载的升温效应会导致 SMA 变形能力降低,从而使得整个滞回循环变得狭长、面积变小,耗能降低。加载频率越高,则转化内能越多, SMA 丝温度也就越高,其耗能能力越低。

在 20℃室温下,不同加载频率和不同加载幅值



(a) 0.01 Hz

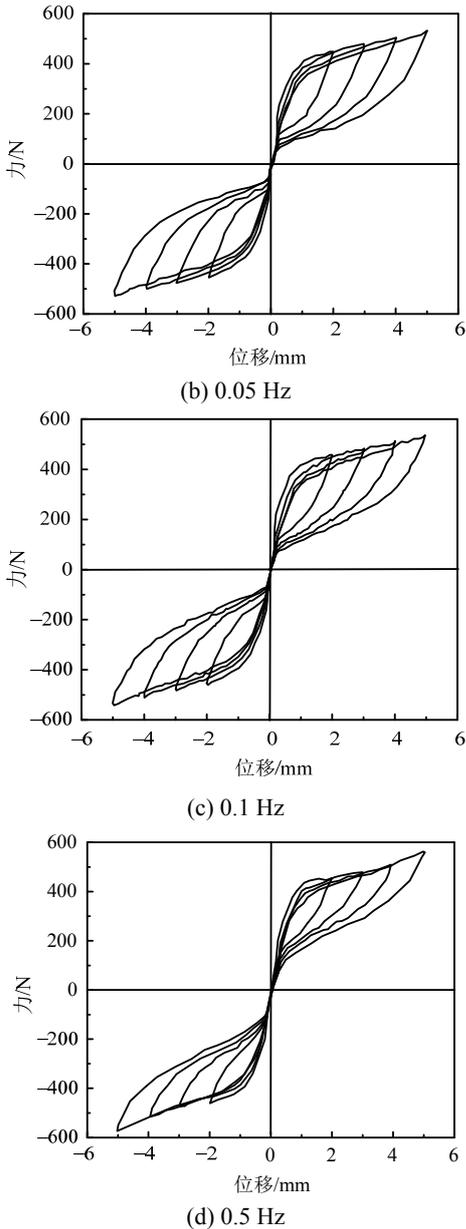


图4 阻尼器在不同加载频率和不同位移幅值下滞回曲线 (初始变形 0.5mm, 温度 20℃)

Fig.4 Hysteresis loop of multidimensional SMA damper under different loading frequencies and displacement amplitudes (Initial displacement 0.5mm, 20℃)

下阻尼器的各项性能指标如表 1 所示, 从中同样能够看出阻尼器的每循环耗能 W 随加载频率增加而降低, 最多降低 40%; 随加载幅值增加而增加, 最

多增加 315%。割线刚度 K 随频率增加略有增加, 最大增幅 14%。这是由于温度升高会抑制奥氏体向马氏体转化, 这种变化有限, 所以等效刚度变化较小。相同加载幅值下, 等效阻尼比 ξ 随频率增加降低; 加载幅值越大 ξ 降低幅度越大, 加载幅值为 5 mm 时, 最高频率对应的等效阻尼比相比最低频率对应的等效阻尼比, 降幅达 47.7%。频率较小时, 等效阻尼比随位移幅值增大而显著增大, 如加载频率 0.01 Hz 时, 5 mm 幅值的等效阻尼比是 2 mm 幅值时的 1.56 倍; 但加载频率较高时, 等效阻尼比趋于一致, 如加载频率为 0.5 Hz 时, 5 mm 幅值的等效阻尼比仅为 2 mm 幅值时的 1.05 倍。

室温 20℃, 加载频率 0.05 Hz 的条件下, 不同初始变形和不同幅值的阻尼器滞回曲线如图 5 所示。可以看出, 初始变形越大, 阻尼器滞回形状越狭长, 耗能能力越低。这是由于 SMA 主要靠微观结构相变消耗外部输入的能量, 初始变形越大用来相变的奥氏体越少, 耗能能力随之降低。

在 20℃室温下, 不同初始变形和不同加载幅值下阻尼器的各项性能指标如表 2 所示, 阻尼器耗能能力随初始变形增加而降低: 加载幅值分别为 2 mm、3 mm 和 4 mm 时, 初始变形 4%时每循环耗能占初始应变为 0%时的每循环耗能的比分别为 70.0%、61.0%和 69.4%。初始变形相同的条件下, 随着加载幅值增大, 割线刚度总体呈下降趋势, 但在初始应变为 4%时, 加载幅值为 3 mm 的割线刚度大于加载幅值为 4 mm 时的割线刚度。这是由于初始变形的增加导致 SMA 相变空间减小, 当加载幅值较大时材料进入硬化阶段, 应力迅速升高, 导致割线刚度变大。等效阻尼比 ξ 随初始应变增加而降低, 这是因为初始应变诱发本应用于耗散能量的奥氏体相变为马氏体, 导致耗能能力下降; 随着加载幅值增大, ξ 总体上呈增大趋势, 但初始应变为 4%时, ξ 值在加载幅值 2 mm(应变 2%)时最大, 这是因为 SMA 阻尼比总在应变为 6%时最大^[5]。加载幅值相同时, 等效阻尼比随初始应变增加而降低。

表 1 多维 SMA 阻尼器工作性能参数(初始应变 0.5%)

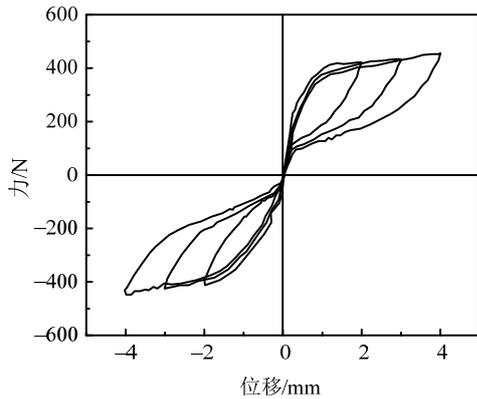
Table 1 Mechanical parameters of multidimensional SMA damper (initial strain of 0.5%)

加载频率 f/Hz	$d = 2 \text{ mm}$			$d = 3 \text{ mm}$			$d = 4 \text{ mm}$			$d = 5 \text{ mm}$		
	W	K	ξ									
0.01	578	217	9.8	1024	152	11.9	1619	119	13.5	2399	100	15.3
0.05	559	230	9.7	1003	161	11.0	1470	126	11.6	1956	106	11.8
0.1	551	235	9.3	943	161	10.4	1337	128	10.4	1752	109	10.2
0.5	443	233	7.6	712	161	7.8	1031	131	7.8	1439	114	8.0

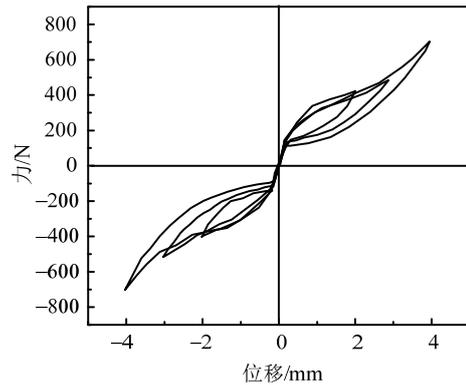
表 2 多维 SMA 阻尼器工作性能参数(加载频率 0.05 Hz)

Table 2 Mechanical parameters of multidimensional SMA damper (loading frequency of 0.05 Hz)

初始应变 ϵ_i (%)	$d = 2 \text{ mm}$			$d = 3 \text{ mm}$			$d = 4 \text{ mm}$		
	W	K	ζ	W	K	ζ	W	K	ζ
0	503	212	9.4	872	149	10.4	1294	114	11.3
1	411	205	8.0	806	149	9.6	1218	121	10.0
2	397	199	7.9	706	152	8.2	1081	131	8.2
4	352	211	6.6	532	171	5.5	898	177	5.0



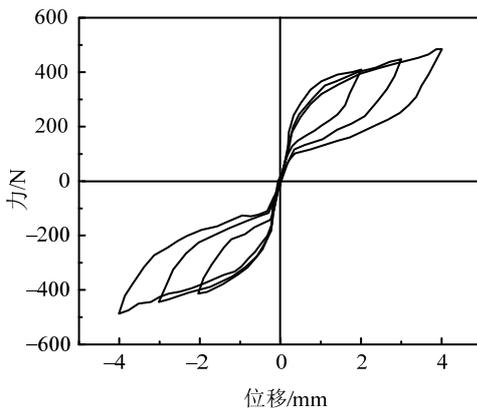
(a) 0%



(d) 4%

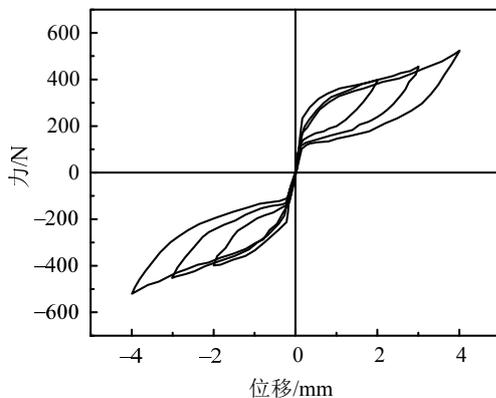
图 5 阻尼器在不同初始变形和不同位移幅值下滞回曲线 (加载频率 0.05 Hz, 温度 20°C)

Fig.5 Hysteresis loop of multidimensional SMA damper under different pre-strains and displacement amplitudes (load frequency of 0.05 Hz, temperature of 20°C)



(b) 1%

图 6 给出了室温 20°C, 初始变形 0.5 mm, 加载频率为 0.01 Hz 时, 加载幅值为 0.04 rad、0.06 rad、0.08 rad 和 0.10 rad 时的阻尼器扭转滞回曲线。可以观察到, 四种加载幅值下阻尼器滞回特性接近, 滞回图形呈饱满旗帜状, 耗能能力优秀; 卸载后阻尼器无残余变形, 具有良好的自复位能力。扭转试验得到的扭矩-角度关系曲线形状与拉伸试验得到的力-位移曲线形状相似, 这符合阻尼器“将扭转化转为阻尼丝拉伸”的设计思路。与拉伸试验结果类似一致, 阻尼器扭转角度越大阻尼器耗能越多。



(c) 2%

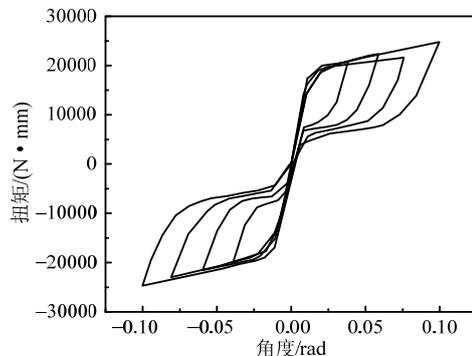


图 6 SMA 阻尼器扭转滞回曲线试验结果

Fig.6 Experimental result of torsion hysteresis loop of SMA damper

3 理论模型

3.1 拉压模型

由材料力学，阻尼丝回复力可表示为：

$$F = \sigma A \quad (3)$$

式中： F 为阻尼器出力； A 为 SMA 丝横截面积。SMA 丝力学模型采用改进的 Graesser-Cozzarelli 模型^[12]，由 $x = x_0 \varepsilon$ (x_0 为 SMA 丝净长度， ε 为应变)，得到微分形式的力-位移关系式：

$$\dot{F} = K_0 \left[\dot{x} - |\dot{x}| \left| \frac{F - B}{B_c} \right|^{n-1} \left(\frac{F - B}{B_c} \right) \right] \quad (4)$$

和

$$B = \beta K_0 \left\{ \begin{aligned} &x_{in} + f_T |x|^c \operatorname{erf}(ax)[u(-x\dot{x})] + f_M \\ &[x - x_{Mf} \operatorname{sgn}(x)]^m [u(x\dot{x})][u(|x| - x_{Mf})] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中： K_0 表示初始刚度； B 为背力， B_c 为 SMA 奥氏体开始向马氏体相变的临界力； β 、 f_T 、 n 、 a 和 c 为控制滞回曲线形状的材料常数，由试验获得； x_{in} 为非弹性位移，定义为 $x_{in} = x - \frac{F}{K_0}$ ； f_M 和 m 为调整马氏体硬化曲线的系数； x_{Mf} 为马氏体相变完成时对应的位移； $\operatorname{erf}(x)$ 、 $u(x)$ 和 $\operatorname{sgn}(x)$ 分别为误差函数、单位阶跃函数和符号函数，表达式依次如下：

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (6)$$

$$u(x) = \begin{cases} +1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (8)$$

表 3 阻尼器数值模拟参数(加载频率 0.01 Hz)

Table 3 Parameters for simulation of SMA damper (loading frequency 0.01 Hz)

参数	E/MPa	Y/MPa	a	f_T	c	β	n	ε_{Mf}	f_M	m
数值	39500	385	0.01	1.14	0.001	550	3	0.05	42500	3

图 8 给出初始变形为 0.5 mm(0.5%应变)，以 0.01 Hz 频率加载时，SMA 阻尼器在不同运动幅值拉伸下的试验和模拟滞回曲线。可以直观看出，数值模拟结果和试验结果吻合较好。

为量化数值模拟的准确性，表 4、表 5 和表 6 分别给出每循环耗散能量、割线刚度和等效阻尼比的试验数据和模拟数据对比，并计算模拟结果误差。从中可以看出，数值模拟结果的误差均控制较好，

3.2 扭转模型

当阻尼器扭转时，SMA 阻尼丝工作原理如图 7 所示。由于 SMA 丝最大可恢复应变为 8%左右，考虑到阻尼丝长度 100 mm 和刚性板宽度 50 mm，阻尼器最大扭转角度 θ 在 10° 左右。在这种情况下，可近似将扭转后的刚性板和 SMA 丝仍视为垂直。

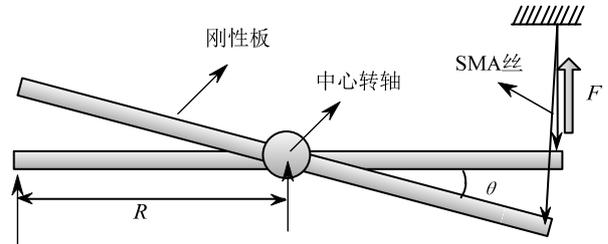


图 7 SMA 阻尼器扭转示意图

Fig.7 Diagram of torsion of SMA damper

阻尼器提供的扭矩由下式给出：

$$M = F \times R \quad (9)$$

式中， R 为转动半径，即刚性板宽度的一半。

刚性板转动角度为 θ 时，SMA 丝伸长量 x 由下式给出：

$$x = \sqrt{(R - R \cos \theta)^2 + (L_0 + R \sin \theta)^2} - L_0 \quad (10)$$

式中， L_0 为阻尼丝初始长度。

将式(10)代入式(9)中，阻尼器扭转角 θ 与扭矩 M 关系为：

$$M = F \left(\sqrt{(R - R \cos \theta)^2 + (L_0 + R \sin \theta)^2} - L_0 \right) \cdot R \quad (11)$$

4 数值模拟

根据上述理论模型，使用 Simulink 对阻尼器力学性能进行数值模拟。表 3 给出详细模型参数。

其中，每循环耗能最大误差 4.2%，割线刚度最大误差 1.2%，等效阻尼比最大误差 4.4%。量化分析表明，阻尼器理论模型能够有效描述阻尼器力学性能。

图 9 给出位移为 0.5 mm(0.5%应变)，以 0.01 Hz 频率加载时，SMA 阻尼器在不同扭转角度下的试验和模拟滞回曲线。表 7 给出扭转滞回曲线的试验结果与数值模拟结果对比，可以看出，数值模拟结果和试验结果吻合较好。

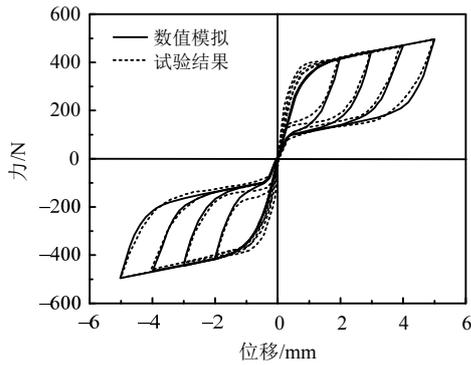


图 8 SMA 阻尼器拉伸滞回曲线试验结果与数值模拟结果

Fig.8 Experimental and simulation results of tension hysteresis loop of SMA damper

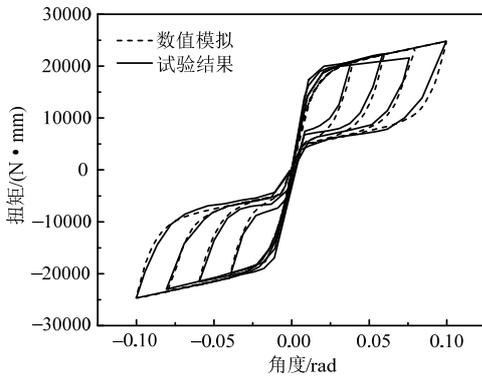


图 9 SMA 阻尼器扭转滞回曲线试验结果与数值模拟结果

Fig.9 Experimental and simulation results of torsional hysteresis loop of SMA damper

表 4 循环耗散能量试验结果与数值模拟对比(拉伸)

Table 4 Comparison of energy dissipation per cycle between experimental and numerical results (tension)

位移幅值/mm	试验结果/(N·mm)	模拟结果/(N·mm)	误差/(%)
2	578.3	554.1	4.2
3	1024.7	997.3	2.6
4	1619.4	1606.2	0.8
5	2399.1	2384.6	0.6

表 5 割线刚度试验结果与数值模拟对比

Table 5 Comparison of secant stiffness between experimental and numerical results

位移幅值/mm	试验结果/(N/mm)	模拟结果/(N/mm)	误差/(%)
2	217.2	214.6	1.2
3	152.4	151.3	0.6
4	119.6	118.6	0.8
5	100.7	100.1	0.6

表 6 等效阻尼比试验结果与数值模拟对比

Table 6 Comparison of equivalent damping ratios between experimental and numerical results

位移幅值/mm	试验结果/(%)	模拟结果/(%)	误差/(%)
2	9.8	9.5	3.1
3	11.9	11.7	1.7
4	13.5	12.9	4.4
5	15.3	15.1	1.3

表 7 循环耗散能量试验结果与数值模拟对比(扭转)

Table 7 Comparison of energy dissipation per cycle between experimental and numerical results (torsion)

扭转角度/rad	试验结果/(N·mm)	模拟结果/(N·mm)	误差/(%)
0.04	556.3	553.9	0.4
0.06	994.9	996.7	0.2
0.08	1593.4	1604.5	0.7
0.10	2369.1	2382.8	0.5

5 结论

本文提出了一种新型多维 SMA 阻尼器，该阻尼器能够提供轴向阻尼和绕轴向扭转的阻尼。详细介绍了该阻尼器的构造和工作原理，并选用改进的 Graesser-Cozzarelli 本构为阻尼器建立了理论模型。对阻尼器进行了拉压和扭转试验，研究了初始应变、加载频率和加载幅值对其滞回特性的影响，并使用 Simulink 程序对阻尼器力学性能进行了数值模拟。通过研究，得到如下结论：

(1) 在拉压和扭转试验中，多维 SMA 阻尼器都呈现饱满稳定的旗帜形滞回曲线，证明其具有优良的耗能性能和自复位能力。

(2) SMA 丝的初始应变越大，阻尼器的滞回曲线越狭长，耗能能力降低。割线刚度会随着初始应变增大而呈下降趋势。

(3) 随加载频率增加，阻尼器的耗能能力逐渐下降，但对自复位能力没有影响。割线刚度随加载频率增加而呈下降趋势。

(4) 分别对阻尼器拉伸和扭转的力学性能进行了数值模拟，模拟结果与试验结果吻合较好，各项指标的最大误差为 4.4%，证明了理论模型的准确性和有效性。

参考文献:

[1] Kari A, Ghassemieh M, Abolmaali S A. A new dual bracing system for improving the seismic behavior of steel structures [J]. Smart Materials & Structures, 2015, 20(12): 125020.

[2] Dieng L, Helbert G, Chirani S A, et al. Use of Shape Memory Alloys damper device to mitigate vibration amplitudes of bridge cables [J]. Engineering Structures, 2013, 56(6): 1547—1556.

[3] Asgarian B, Salari N, Saadati B. Application of intelligent passive devices based on shape memory alloys in seismic control of structures [J]. Structures, 2016, 5: 161—169.

[4] Adachi Y, Unjoh S, Kondoh M. Development of a shape memory alloy damper for intelligent bridge systems [J].

- Spie Proceedings, 2000, 3671: 31—42.
- [5] 李宏男, 钱辉, 宋钢兵, 等. 一种新型 SMA 阻尼器的试验和数值模拟研究[J]. 振动工程学报, 2008, 21(2): 179—184.
- Li Hongnan, Qian Hui, Song Gangbing, et al. A new type of shape memory alloy damper: design, experiment and numerical simulation [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, 21(2): 179—184. (in Chinese)
- [6] 李惠, 毛晨曦. 新型 SMA 耗能器及结构地震反应控制试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(1): 133—139.
- Li Hui, Mao Chenxi. Experimental investigation of earthquake response reduction of buildings with added two types of SMA passive energy dissipation devices [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(1): 133—139. (in Chinese)
- [7] 任文杰, 王利强, 穆蒙蒙. SMA 阻尼器控制单自由度结构在地震激励下的平稳随机振动研究[J]. 工程力学, 2016, 33(4): 98—103.
- Ren Wenjie, Wang Liqiang, Mu Mengmeng. Research on stationary random vibration of single-degree-of-freedom structure with shape memory alloy damper subjected to earthquake excitation [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(4): 98—103. (in Chinese)
- [8] 崔迪, 李宏男, 宋钢兵. 形状记忆合金混凝土梁力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(2): 117—123.
- Cui Di, Li Hongnan, Song Gangbing. Behavior of SMA reinforced concrete beam [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2): 117—123. (in Chinese)
- [9] Indirli M, Castellano M G, Clemente P, et al. Demo-application of shape memory alloy devices: the rehabilitation of the S. Giorgio Church bell tower [C]. Newport Beach, CA: International Society for Optics and Photonics, 2001: 262—272.
- [10] Alsaleh R, Casciati F, El-Attar A, et al. Experimental validation of a shape memory alloy retrofitting application [J]. Journal of Vibration & Control, 2012, 18(1): 28—41.
- [11] 钱辉, 李宏男, 任文杰, 等. 形状记忆合金复合摩擦阻尼器设计及试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 58—64.
- Qian Hui, Li Hongnan, Ren Wenjie, et al. Experimental investigation of an innovative hybrid shape memory alloys friction damper [J]. Journal of Building Structure, 2011, 32(9): 58—64.
- [12] 钱辉, 李宏男, 宋钢兵. 基于塑性理论的形状记忆合金本构模型试验和数值模拟[J]. 功能材料, 2007, 38(7): 1114—1118.
- Qian Hui, Li Hongnan, Song Gangbing. Constitutive model of shape memory alloy based on plastic theory: Experiment and simulation [J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38(7): 1114—1118. (in Chinese)