

# SMA 金属橡胶阻尼器减振效能试验研究

孟庆利

(西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 针对所提出形状记忆合金(shape memory alloy-SMA)金属橡胶减振器开展试验研究. 通过拟静力试验着重分析探讨了加载频率和位移幅值对 SMA 金属橡胶减振器中 SMA 金属橡胶元件的刚度和阻尼特性等力学性能的影响. 试验结果表明: SMA 金属橡胶刚度随加载频率和位移幅值的增大而增大, 能量耗散系数  $\psi$  基本不受加载频率影响, 但随位移幅值的增大而减小; 并通过地震模拟振动台试验研究探讨 SMA 金属橡胶减振器的减振效能.

**关键词:** SMA 金属橡胶; 刚度; 能量耗散系数; 拟静力试验; 振动台试验

**中图分类号:** TU712

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)06-0804-04

## The study on dissipation behavior of SMA pseudo-rubber metal damper by experiments

MENG Qingli

(School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In this paper, an experimental research on the shape memory alloy (SMA) pseudo-rubber metal damper was studied. The influence of loading frequency and displacement amplitude to the SMA pseudo-rubber metal in SMA pseudo-rubber metal damper was studied and discussed by pseudo-static test. The conclusion show that the stiffness of SMA pseudo-rubber metal increases with the increase of the loading frequency and displacement amplitude. The loading frequency has little influence on energy dissipation factor  $\psi$ . However, it decreases with the increase of displacement amplitude. Moreover, the vibration reduction efficiency of SMA pseudo-rubber metal damper was researched and discussed by seismic simulation shaking table test.

**Key words:** SMA pseudo-rubber metal; stiffness; energy dissipation factor; pseudo-static test; shaking table test

目前各国学者都在努力探索 SMA 超弹性特性在振动控制领域的应用<sup>[1]</sup>. 研究表明: 各种形式的 SMA 减振器有一定的阻尼性能, 但相对其它大阻尼的粘弹性减振结构, 其阻尼特性仍然欠缺, 而且在承载力方面也有所不足, 所以有必要探索新型的 SMA 减振器设计方案<sup>[2-4]</sup>.

近年来逐渐发展起来的拟橡胶金属技术是一种很好的增大阻尼的方法<sup>[5-6]</sup>. 由于拟橡胶金属减振器由很多的小弹簧组成, 在受到外力作用时, 小弹簧之间的相互滑移产生的磨擦必然消耗部分能量, 因此, 在具备了金属减振优点的同时, 其阻尼性能较好, 所占空间体积小, 制成的减振器形状自由, 有较大的应用潜力<sup>[7-10]</sup>. 此外, SMA 的超弹性特性是一种特殊的滞回耗能性能, 并具有较好的抗腐蚀、抗疲劳能力, 较大的可恢复应变、在工程应用的温度和频率区间具有稳定的力学性能等.

所以本文针对所提出的 SMA 金属橡胶减振器开展试验研究, 首先, 通过拟静力试验研究 SMA 金属橡胶元件的力学特性(阻尼、刚度等); 然

后, 通过地震模拟振动台试验研究探讨 SMA 金属橡胶减振器的减振效能, 并提出设计建议.

### 1 SMA 金属橡胶阻尼器耗能减振性能

#### 1.1 拟静力实验

利用 MTS 试验加载设备对外径 35 mm、内径 15 mm、高度 12 mm、丝径 0.25 mm、孔隙 1 mm 的圆柱型中空 SMA 金属橡胶元件进行拟静力试验. 图 1 为 SMA 金属橡胶元件拟静力试验图. 得到 SMA 金属橡胶元件力和位移滞回曲线, 并分析其力学性能(主要是刚度和阻尼特性)的变化. 表 1 为不同频率、不同位移幅值下 SMA 金属橡胶的刚度; 图 2 分别为 1 mm 和 3 mm 位移幅值下, 加载频率对 SMA 金属橡胶元件力学性能的影响.

表 1 数据显示在 0.5 Hz 加载频率时, SMA 金属橡胶元件刚度随位移幅值从 133 N/mm 一直增加到 493 N/mm, 比最初刚度增大了 3 倍左右, 在 1.5 Hz 加载频率时, SMA 金属橡胶元件刚度依然随位移幅值增加而增大, 从 142 N/mm 增大 612 N/mm, 比最初刚度增大了 3.5 倍左右, 其他加载

收稿日期: 2015-07-13

修改稿日期: 2015-12-09

资助项目: 四川省教育厅重点项目(14zd1111); 西南科技大学博士基金(13zx7144); 国家自然科学基金青年基金(50808163)

作者简介: 孟庆利(1974-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为结构振动控制与结构抗震、加固结构动力实验技术. E-mail:swustqlmeng@126.com

频率下，SMA 金属橡胶元件刚度变化趋势基本相同。说明在相同频率下，SMA 金属橡胶元件的刚度随位移幅值的增大而增大。因为 SMA 金属橡胶作为一种空间网状结构，在不受外力影响时，其内部金属丝之间孔隙较大，密实度低，刚度小。当受到外力作用产生变形时，内部金属丝之间孔隙变小，SMA 金属橡胶元件密实度变大，导致其刚度增大，而且 SMA 金属橡胶元件变形时，内部金属丝之间相互接触，在接触点处产生干摩擦力，使其刚度再次增大。所以在相同加载频率下，SMA 金属橡胶的刚度随着位移幅值的增加而增加。



图 1 SMA 金属橡胶元件拟静力试验图  
Fig.1 Pseudo-static test of SMA pseudo-rubber metal

表 1 SMA 金属橡胶元件刚度 (N/mm)  
Tab.1 Stiffness of SMA pseudo-rubber metal

位移幅值/mm	加载频率			
	0.5Hz	1Hz	1.5Hz	2Hz
0.5	133	166	142	172
1	170	201	199	196
1.5	212	219	228	239
2	254	251	274	331
2.5	324	378	391	410
3	493	586	612	753

表 1 和图 2 表明在 1 mm 位移幅值下，力幅值在不同频率下差异不大，而在 3 mm 位移幅值下，力幅值随加载频率的增大而增大。当位移幅值相同时，SMA 金属橡胶元件内部孔隙基本相同，密实度差异不大，而导致刚度变化的原因很可能是金属丝之间的干摩擦力。当变形较小时，SMA 金属橡胶元件内部金属丝之间虽然已经开始接触，但接触点相对较少，金属丝之间干摩擦力很小，即使频率增大其等效摩擦力差别也不大，所以 SMA 金属橡胶元件刚度相差不大；当变形较大时，SMA 金属橡胶元件内部金属丝之间接触点增多，金属丝之间干摩擦力增大，在较大频率下金属丝来回摆动而引起的等效摩擦力也相应增加，而且频率越大等效摩擦力的增强效果越明显，所以 SMA 金属橡胶元件刚度随加载频率增加而增大。

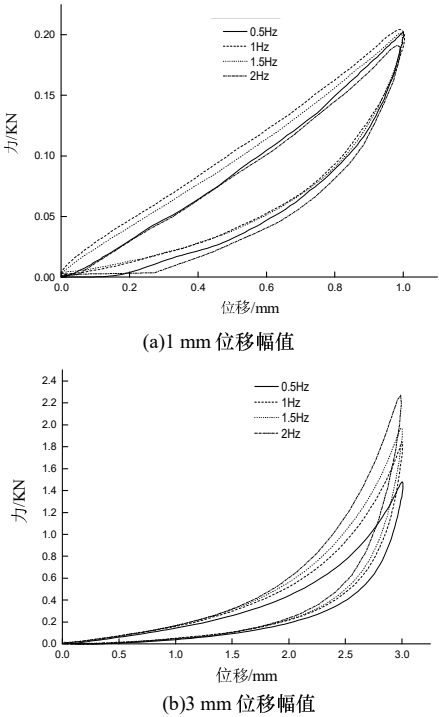


图 2 SMA 金属橡胶元件滞回曲线  
Fig.2 Hysteretic curve of SMA pseudo-rubber metal

本文采用能量耗散系数  $\Psi$  这一参数来表征金属橡胶的干摩擦阻尼特性<sup>[8]</sup>，其计算公式为： $\Psi = \Delta W / W$  其中， $\Delta W$  为阻尼元件在一个周期内耗散的能量， $W$  为阻尼元件在变形范围内具有的最大变形能。表 2 为在不同频率、不同幅值下 SMA 金属橡胶元件的能量耗散系数。

表 2 SMA 金属橡胶元件能量耗散系数  
Tab. 2 Energy dissipation factor of SMA pseudo-rubber metal

位移幅值/mm	加载频率			
	0.5Hz	1Hz	1.5Hz	2Hz
0.5	0.3	0.31	0.31	0.28
1	0.25	0.28	0.27	0.24
1.5	0.23	0.24	0.23	0.22
2	0.21	0.21	0.2	0.19
2.5	0.18	0.17	0.17	0.16
3	0.14	0.13	0.13	0.12

表 2 数据显示，在 0.5 mm 位移幅值时，SMA 金属橡胶元件能量耗散系数基本维持在 0.3 左右；在 3 mm 位移幅值时，SMA 金属橡胶元件能量耗散系数维持在 0.13 左右，随加载频率变化都很小。其他加载频率下，变化趋势也大致相同。说明当位移幅值相同时，SMA 金属橡胶元件能量耗散系数受加载频率影响不大。因为 SMA 金属橡胶作为一种摩擦耗能元件，其干摩擦力大小是由金属丝之间的摩擦系数决定的<sup>[4]</sup>。而摩擦系数是材料的固有特性，与加载频率无关。所以在位移幅值不变的情况下，即使加载频率变化，其能量耗散系数也基本维持不变。

在 0.5Hz 加载频率下, SMA 金属橡胶元件能量耗散系数随位移幅值从 0.3 一直降低到 0.14, 约下降了 50%; 在 2 Hz 加载频率下, SMA 金属橡胶元件能量耗散系数随位移幅值从 0.28 一直降低到 0.12, 也降低了 50% 左右. 说明在相同频率下, 能量耗散系数随位移幅值的增大而减小. 因为 SMA 金属橡胶内部金属丝之间摩擦力由摩擦系数决定, 而摩擦系数是材料固有特性, 基本维持不变, 因此在相同变形内 SMA 金属橡胶元件所耗散的能量  $\Delta W$  相同, 但计算能量耗散系数的最大变形能  $W$  (因刚度随位移增大而极具增加) 随位移增大而极具增大, 所以在相同频率下, SMA 金属橡胶元件随位移幅值增大而减小.

### 1.2 振动台试验

为研究探讨 SMA 金属橡胶减振器的减振效能, 利用 WS-Z30 小型精密振动台系统, 对由二组性能完全相同的 SMA 金属橡胶元件、外壳、连接杆和连接固定等组成的 SMA 金属橡胶减振器进行地震模拟振动台试验, SMA 金属橡胶减振器垂直安置在振动台上, 试验时振动台垂直向输入地震动分量. 图 3 为 SMA 金属橡胶减振器振动台试验图, 在 SMA 金属橡胶减振器上面固定 1kg 配重块, 在配重块上固定一个加速度传感器, 采集其竖向绝对加速度时程, 在振动台面上固定一个加速度传感器, 采集振动台面竖向的绝对加速度时程.

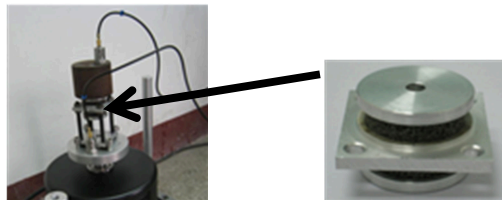
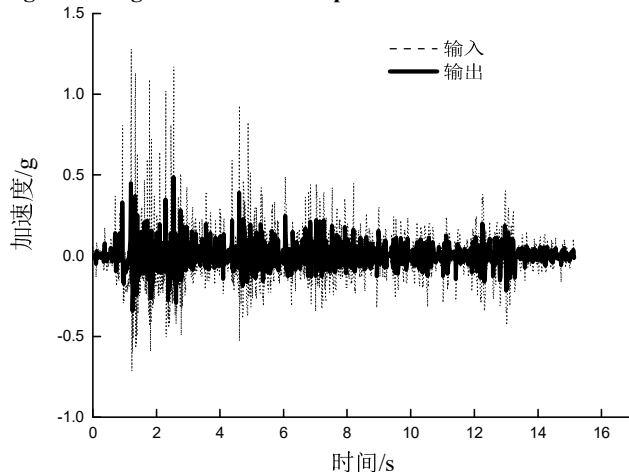


图 3 SMA 金属橡胶减振器振动台试验图

Fig.3 Shaking table test of SMA pseudo-rubber metal



(a) EL NS 向地震动输入

### 1.2.1 地震动输入

试验所用地震动为 EL Centro 波和卧龙波, EL Centro 波包含频谱成份丰富, 卧龙波是四川 5.12 大地震典型地震动, 故选取该两条波进行试验测试 SMA 金属橡胶减振器的减振效能, 其主要特性如表 3 所示.

表 3 输入地震动的主要特性

Tab.3 The main feature of input seismic motions

地震动	方向	幅值/g	主要频率/s
El Centro	N-S	0.914	1.99
	E-W	1.29	1.90
卧龙	N-S	0.218	5.54
	E-W	0.245	3.11

### 1.2.2 传导比

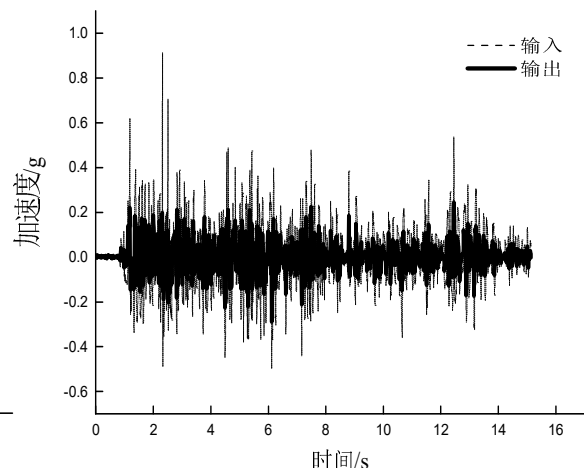
传导比  $\gamma$  为输出加速度峰值与输入加速度峰值的比值, 是表征 SMA 金属橡胶减振器减振效能的重要参数之一.

表 4 SMA 金属橡胶减振器传导比

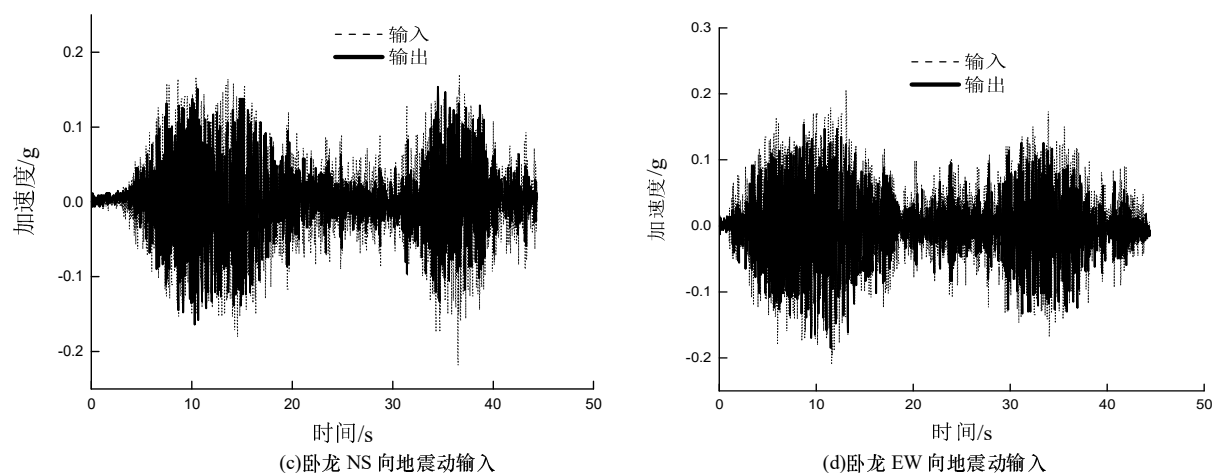
Tab.4 Transmission ratio of SMA pseudo-rubber metal

地震动	输入峰值/g	输出峰值/g	传导比 $\gamma$
EL CEN.NS 方向	0.289	0.914	0.316
EL CEN.EW 方向	0.486	1.29	0.377
卧龙 NS 向	0.158	0.218	0.725
卧龙 EW 向	0.154	0.241	0.755

根据图 4 和表 4 显示输入的地震动中, 传导比的值均小于 1, 在 EL CENTRO 波地震动下, 得到的传导比仅在 0.35 左右, 减振效果十分明显, 在输入卧龙波地震动下, 得到的传导比大约在 0.75 左右, 减振效果较好. 说明 SMA 金属橡胶减振器在 EL CENTRO 波和卧龙波地震动作用下, 减振效能较好. 但是在两种地震动作用下, 传导比不同, 说明在具有不同频谱特性的地震动作用下, SMA 金属橡胶减振器的减振效能各不相同. 综上所述, SMA 金属橡胶减振器具有耗能减振功效.



(b) EL EW 向地震动输入



(c)卧龙 NS 向地震动输入

(d)卧龙 EW 向地震动输入

图4 SMA 金属橡胶减振器输入与输出加速度时程对比图

Fig.4 The comparison of input and output Acceleration time histories of SMA pseudo-rubber metal damper

### 3 结论

本文针对所提出的 SMA 金属橡胶减振器,通过 SMA 金属橡胶元件力学特性的拟静力试验和 SMA 金属橡胶减振器的地震模拟振动台试验研究,得到以下结论:

(1)在相同加载频率下, SMA 金属橡胶元件的刚度随位移幅值的增大而增大. 当变形较小时, SMA 金属橡胶元件刚度受加载频率影响不大,当变形较大时, SMA 金属橡胶元件刚度随加载频率的增大而增大.

(2)SMA 金属橡胶元件的能量耗散系数基本不受频率影响;但随着位移幅值增大, SMA 金属橡胶元件能量耗散系数减小.

(3)在输入的地震动中, 传导比  $\gamma$  均小于 1, 其减振效果明显. 但对于不同的地震输入, SMA 金属橡胶减振器的减振效能各不相同. 因此对于不同的地震输入和不同的结构, 要针对不同的地震动频谱特性和结构特点, 对 SMA 金属橡胶减振器的力学参数(刚度、阻尼特性等)进行专门的设计, 避免 SMA 金属橡胶减振器在地震作用下产生近似类共振.

### 参考文献 References

- [1] HOUSNER G. W. et al, Structural Control: Past, Present, and Future[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123 (9): 897-971.
- [2] GRASSER E J, COZZARELLI F A. Shape memory alloys as new materials for aseismic isolation[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1991, 117 (11): 2590-2608
- [3] PIEDBOEUF M C, GAUVIN R. Damping behavior of shape memory alloys: strain amplitude, frequency and temperature effects[J]. J of Sound and Vibration, 1998, 214(5): 885-901
- [4] 韩玉林, 李爱群, 林萍华, 等. 基于形状记忆合金的结构振动控制研究与展望[J]. 东南大学学报: 自然科学版. 2000, 30(1): 146-154.

HAN Yulin, LI Aiqun, LIN Pinghua, et al. Research and prospect of civil structure vibration control by shape memory alloy[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2000, 30(1): 146-154.

- [5] 敖宏瑞, 姜洪源, 夏宇宏, 等. 金属橡胶干摩擦阻尼系统动态性能分析方法的研究[J]. 中国机械工程, 2003(23): 2053-2055
- AO Hongrui, JIANG Hongyuan, XIA Yuhong, et al. The study on the metal rubber dry frictional damping system dynamic performance analysis method[J]. China mechanical engineering, 2003 (23): 2053-2055.
- [6] 姜洪源, 夏宇宏, 敖宏瑞, 等. 金属橡胶构件的性能分析与试验研究[J]. 中国机械工程, 2001(11): 1294-1297.
- JIANG Hongyuan, XIA Yuhong, AO Hongrui et al. The mechanical analyse and experimental study on pseudo-rubber metal element[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2001(11): 1294-1297.
- [7] 李化. 形状记忆合金在结构抗震中的运用[J]. 辽宁工程学院学报, 2007(26): 312-315.
- LI hua, Application of SMA to enhancing structure seismic performance[J]. Journal of Liaoning Institute of Technology, 2007(26): 312-315.
- [8] 李玉龙, 何忠波, 白鸿柏, 等. 金属橡胶的研究及应用进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2001(34): 103-108.
- LI Yulong, HE Zhongbo, BAI Hongbai et al. Advances in research and application of metal rubber[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2001(34): 103-108.
- [9] 孟庆利, 阎维明, 张敏政, 等. 形状记忆合金(sma) 金属橡胶阻尼器研制[C]//中国(北京) 国际建筑科技大会论文集, 科学出版社, 2010.
- MENG Qingli, YAN Weiming, ZHANG Minzheng, et al. Study on SMA pseudo-rubber metal damper[C]//3rd International Conference on Technology of Architecture and Structure (ICTAS-Beijing 2010): 159-166.
- [10] 孟庆利, 闫维明, 冯军和. 形状记忆合金金属橡胶阻尼器防高墩桥梁地震碰撞振动台试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(2): 201-206.
- MENG Qingli, YAN Weiming, FENG Junhe, Shaking table testing of seismic pounding of high-pier bridge with an SMA PRM damper[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(2): 201-206.

(编辑 吴海西)