

新型 SMA-粘滞阻尼器的试验研究*

禹奇才, 刘爱荣, 姚 远
(广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要: 研究了常温下 NiTi 形状记忆合金 (SMA) 丝的超弹性性能以及在不同加载频率下的滞回性能, 获得了其力学参数; 基于 NiTi SMA 丝和成品粘滞阻尼器设计研制了一种新型 SMA-粘滞阻尼器, 并通过试验研究了 SMA-粘滞阻尼器加载频率与耗能能力、等效阻尼比、等效刚度间的关系。研究表明, 所研制的 SMA-粘滞阻尼器具有优良的耗能能力, 适合于长周期结构的振动控制。

关键词: 形状记忆合金; 粘滞阻尼器; SMA-粘滞阻尼器; 耗能

中图分类号: U448.25; TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 06-0120-04

优良的振动控制装置可以有效地改善和提高工程结构的动力性能, 大幅度减轻工程结构在强风和地震作用下的反应, 确保结构在强烈振动下的安全性。而振动控制装置的研发往往依赖于工程材料的发展, 近年来利用智能材料独特的性能, 开发阻尼耗能器与减震器成为工程界的一个研究热点。

形状记忆合金作为一种新型的智能材料, 在工程结构振动控制中得到了广泛的应用^[1]。与普通材料相比形状记忆合金具有独特的形状记忆效应和超弹性效应、高阻尼和变刚度特性、较好的抗腐蚀能力、抗疲劳效应、较大的可恢复应变 (达 6% ~ 8%)、在工程应用的温度和频率区间具有稳定的力学性能等等^[2-3]。到目前为止, 各国学者基于形状记忆合金材料已经研制出了针对不同结构振动控制的阻尼器。1994 年美国 Robery 领导的研究小组研制出了 SMA 中心引线 (CT) 型阻尼器^[4]; 2000 年 Mauro 等在 Robery 研究的基础上基于试验将 CT 型阻尼器进一步改进^[5]; 2004 年彭刚建立了 CT 型阻尼器的力学模型^[6]; 我国学者姜袁等利用 SMA 丝和 SMA 弹簧设计制作了一种伸缩式 SMA 阻尼器^[7]。

本文首次基于 SMA 丝和成品油粘滞阻尼, 设计研制出了一种新型 SMA-粘滞阻尼器, 试验研究表明与现有成品粘滞阻尼器相比, 其阻尼耗能能力效果更明显, 并且可以有效地弥补常规粘滞阻尼器低频下耗能能力较低这一缺陷。为了确定所研制的 SMA-粘滞阻尼器 SMA 丝的力学参数以及耗能能力, 本文还在常温下对 SMA 丝的超弹性性能进行了试验研究。

1 SMA 丝超弹性力学行为试验

试验选取长度为 250 mm、直径 2 mm 的 NiTi-SMA 丝作为试验对象, 加载频率为 0.02、0.1、0.5 Hz 和 1 Hz, 应变幅值为 6%, 预先训练 10 次, 循环加载次数为 5 次; 加载设备为 WDW-100C 型电子万能试验机, 试验温度为 26 °C。受篇幅限制, 本文只给出了加载频率为 0.02 和 1 Hz 下, NiTi-SMA 丝的滞回曲线, 如图 1 和图 2 示。

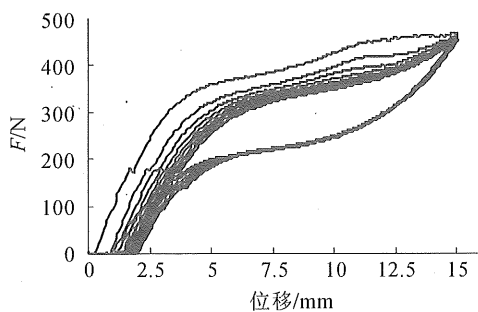


图 1 0.02 Hz 下的滞回曲线

Fig. 1 Hysteretic curves at 0.02 Hz

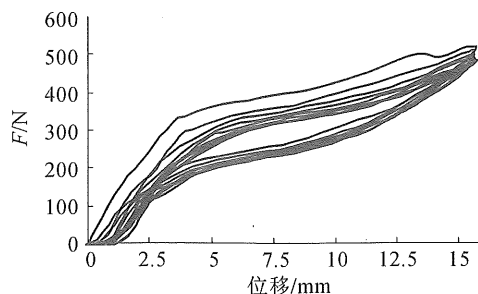


图 2 1 Hz 下的滞回曲线

Fig. 2 Hysteretic curves at 1 Hz

* 收稿日期: 2008-10-23

基金项目: 广东省科技计划基金资助项目 (2005B10201023); 广州市科技计划基金资助项目 (2006J1-C0471)

作者简介: 禹奇才 (1955 年生), 男, 教授; E-mail: Yuqicai@163.com

图1表明加载频率为0.02 Hz下, NiTi-SMA 丝的滞回曲线比较饱满, 滞回面积较大, 而图2则表明在加载频率为1 Hz的情况下, NiTi-SMA 丝的滞回曲线相对较为扁平, 滞回环面积较小, 说明SMA 丝在低频下的耗能能力较高频下强。为了系统研究加载频率与 NiTi-SMA 丝滞回曲线进行了回归, 由图3可知, 随着试验加载频率的增加, 滞回曲线的滞回环面积(单位耗能面积)在减小, 说明在相同的预应变和位移行程下, 相同SMA 丝的耗能能力随着加载频率的增加而降低。

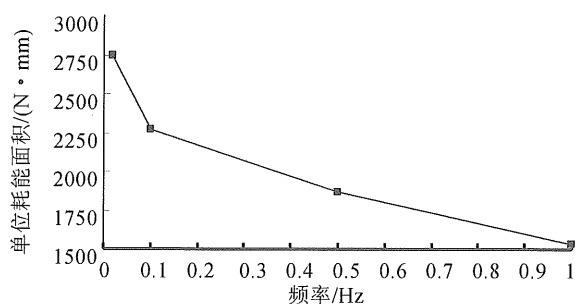


图3 频率与耗能能力间的关系曲线

Fig. 3 Curve of frequency and energy dissipation capacity

2 SMA-粘滞阻尼器的设计

本文设计的 SMA-粘滞阻尼器的结构示意图如图4所示, 图5为实物照片。其中 SMA 丝材选用 NiTi 合金丝, 粘滞阻尼器选用普通硅油阻尼器, 其阻尼力与速度间的关系为 $F = CV^\alpha$, 其中 F 为阻尼力, C 为阻尼常数, V 为阻尼器活塞相对外壳的运动速度, α 为阻尼指数。

利用 SMA 丝的超弹性滞回耗能的特点, 在普通油粘滞阻尼器的外壳上设置若干组 SMA 丝, 每组由 2 根 SMA 丝组成, 一端锚固在固定板上, 另一端锚固在固定螺丝上。通过调节固定螺丝, 可张拉形状记忆合金丝, 使其产生预应变。当粘滞阻尼器活动端产生相对位移时, 就可以发挥其阻尼耗能作用。在此期间, 连接杆带动滑块产生位移, 迫使 SMA 丝左右运动, 使得每组合金丝的一侧被拉伸, 一侧收缩, 在左右两侧的合金丝共同作用的过程中, SMA 丝超弹性高阻尼的特点得到了充分利用, 从而达到与粘滞阻尼器共同耗能的作用, 这就是 SMA-粘滞阻尼器的工作原理。

普通油粘滞阻尼器是通过迫使阻尼筒中的硅油通过活塞上的小孔来产生阻尼力, 阻尼力与加载速度有关, 通常在低频情况, 由于加载速度小, 导

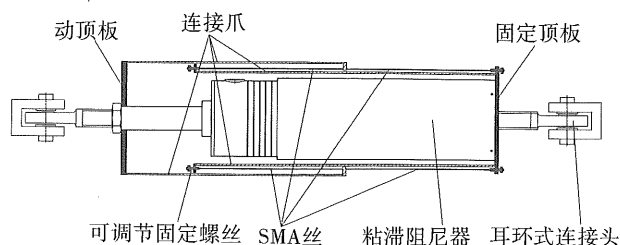


图4 SMA-粘滞阻尼器结构示意图

Fig. 4 Schematic drauling

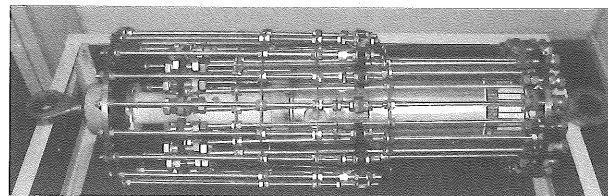


图5 SMA-粘滞阻尼器照片

Fig. 5 The photo of SMA-fluid viscous damper

致阻尼力较小, 耗能能力较弱。相反从图3可知, SMA 丝材在低频下具有较强的能量耗散能力, 正好可以弥补普通粘滞阻尼器的这一不足。如若完全利用 SMA 丝材提供阻尼力, 忽略普通粘滞阻尼器的影响, 考虑到 SMA 丝材价格比较昂贵, 势必导致阻尼器造价较为昂贵, 所以综合利用 SMA 丝材和普通油粘滞阻尼器的阻尼特性以及造价优势, 研制这一新型 SMA-粘滞阻尼器是很有必要的。

3 SMA-粘滞阻尼器的试验研究

试验采用位移控制的加载方式, 位移呈如下正弦规律变化:

$$u = A \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

其中, A 为加载系统输入的位移幅值, f 为加载频率, t 为加载时间。通过加载设备输入不同的位移幅值、频率, 测定 SMA-粘滞阻尼器的以下参数: ① 单位循环消耗能量 W_c ; ② 等效割线刚度 K_s ; ③ 等效阻尼比 ξ_a ,

$$\left. \begin{aligned} K_s &= \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\Delta_{\max} - \Delta_{\min}} \\ \xi_a &= \frac{W_c}{2\pi K_s \Delta^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

上式中: Δ 为滞回循环的幅值; $F_{\max}$ 为加卸载循环中的最大输出力; $F_{\min}$ 为加卸载循环中的最小输出力; $\Delta_{\max}$ 为加卸载循环中的最大位移; $\Delta_{\min}$ 为加卸载循环中的最小位移; ω 为试验的加载频率。

本次试验研究了最大行程为 5、6、7 和 8 mm, 加载频率为 0.1、0.2、0.5 和 1 Hz 下, SMA-粘滞阻尼器的阻尼力和位移滞回曲线, 从而确定其单位

循环消耗能量、等效割线刚度和等效阻尼比。由于篇幅限制本文只给出了最大行程为 6 mm, 加载频率为 0.1 Hz 和 1 Hz 时阻尼器的滞回曲线, 如图 6 示。由图 6, 在 0.1 Hz 下阻尼力和位移滞回曲线比较光滑饱满面积较大, 而在 1 Hz 下滞回曲线呈梭形, 滞回面积相对较小, 说明本文所研制的 SMA-粘滞阻尼器在低频情况下耗能能力较高频情况下强。

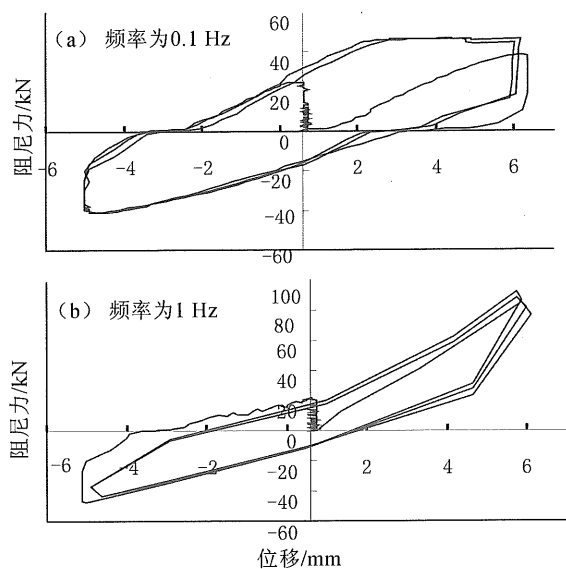


图 6 SMA-粘滞阻尼器的滞回曲线

Fig. 6 The hysteretic curves of SMA-fluid viscous damper

表 1 归纳总结了在不同的加载行程和频率下 SMA-粘滞阻尼器和普通硅油粘滞阻尼器的单位循环耗能, 说明与普通粘滞阻尼器相比, SMA-粘滞阻尼器的耗能能力得到了较大提高, 尤其是在低频情况下, 最大提高幅度可以达到 49%。图 7 ~ 图 8 给出了不同行程下, SMA-粘滞阻尼器加载频率与单位循环耗能、等效刚度与等效阻尼比间的试验关系曲线, 试验结果表明 SMA-粘滞阻尼器在低频情况下, 特别是在 0.5 Hz 左右耗能能力较强, 并且随着频率的增加等效刚度不断提高, 相反等效阻尼比却在不断减小, 进一步说明了 SMA-粘滞阻尼器在低频下耗能能力较强。

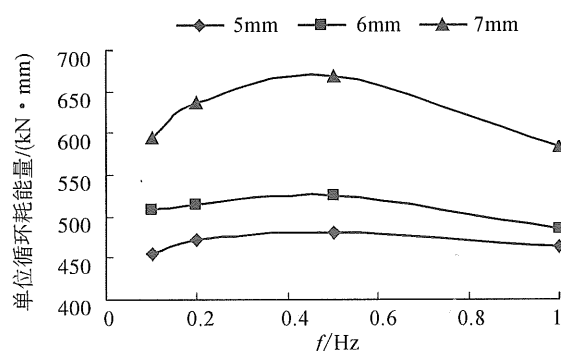


图 7 频率与单位循环耗能间的关系曲线

Fig. 7 Curves of frequency and unit cyclic dissipation energy

表 1 SMA-粘滞阻尼器和普通油粘滞阻尼器的单位循环消耗能量

Tab. 1 Unit cyclic dissipation energy of SMA-viscous damper and ordinary viscous damper

f/Hz	SMA-粘滞阻尼器				普通粘滞阻尼器			
	5.0	6.0	7.0	8.0	5.0	6.0	7.0	8.0
0.1	455.95	507.44	593.44	671.88	306.24	438.20	515.10	559.30
0.2	471.22	514.90	637.13	737.67	321.15	459.61	522.90	618.74
0.5	480.40	525.17	668.65		375.45	468.50	523.90	
1.0	463.24	483.72	584.76		381.83	472.31	537.60	

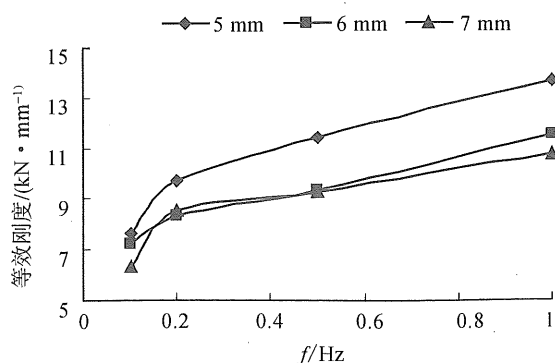


图 8 频率与等效刚度间的关系曲线

Fig. 8 Curves of frequency and equivalent stiffness

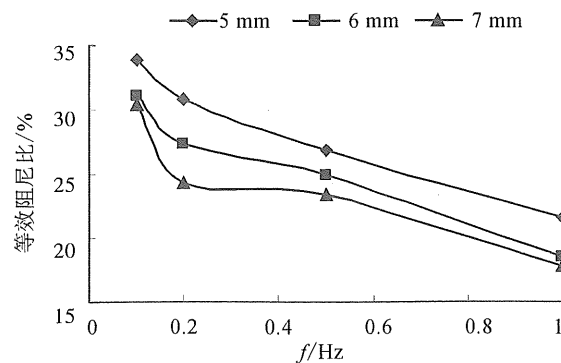


图 9 频率与等效阻尼比间的关系曲线

Fig. 9 Curves of frequency and equivalent damping ratio

4 结 论

通过以上试验研究, 可得出以下结论:

(1) NiTi 形状记忆合金在常温下具有高阻尼性能, 适合工程结构的耗能减震, 并且其耗能能力随着频率的增加而降低。

(2) 与普通粘滞阻尼器比, 本文所研制开发的新型 SMA-粘滞阻尼器具有良好的耗能能力, 尤其是在低频情况下, 其耗能能力较普通粘滞阻尼器可提高 49%。

(3) 本文所研制的 SMA-粘滞阻尼器阻尼比随着加载频率的增加而减小, 相反其等效刚度却随着加载频率的增加而增加。

(4) 本文所研制的 SMA-粘滞阻尼器适合于基频较低的长周期结构的振动控制, 具有良好的减震应用前景。

参考文献:

- [1] 姚远. 基于形状记忆合金的阻尼器在大跨度桥梁结构纵向振(震)动控制中的研究[D]. 广州大学, 2008.
YAO Yuan. The study on a damper based on shape memory alloy in the longitudinal vibration of the long span bridge structure[D]. Master Dissertation of Guangzhou University, 2008, 6.
- [2] 刘爱荣. 形状记忆合金的本构模型及其有限元分析[D]. 西南交通大学, 2001.
LIU Airong. Constitutive models of shape memory alloys and their applications in finite element analysis[D].

- Southwest Jiaotong University Doctor Degree Dissertation. 2001.
- [3] 刘爱荣, 潘亦苏, 周本宽. 形状记忆合金热力学行为的模拟[J]. 计算力学学报, 2002, 19(1): 48-52.
LIU Airong, PAN Yisu, ZHOU Ben kuan. Simulation to thermo-mechanical behavior of shape memory alloys[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2002, 19(1): 48-52.
- [4] ROBERT C K. Structural damping with shape-memory alloy: one class device[C]. SPIE, 1995, 2445-240.
- [5] MAURO Doclee, DONATELLO Cardone, Roberto Mar-netto. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys[J]. Earthquake Energy and Structure Dynamics, 2000, 29, 945-968.
- [6] PETER W C. Experimental and analytical studies of shape memory alloy dampers for structure control[C]. SPIE, 1995, 2445: 241-251.
- [7] 彭刚, 李黎, 唐家祥. SMA 耗能器的阻尼特性分析及器件设计方法[J]. 固体力学学报, 2003, 24(1): 109-112.
PENG Gang, LI Li, TANG Jiaxiang. Damping characteristic analysis of SMA damper and method of device[J]. Acta Mechanica Solid sinica, 2004, 17(1): 31-34.
- [8] 姜袁, 赵家成, 彭刚. SMA 耗能器的阻尼性能试验研究[J]. 振动工程学报, 2004, 17(1): 31-34.
JIANG Yuan, ZHAO Jiacheng, PENG Gang. Experimental study of damping capacity of SMA energy dissipation damper[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(1): 31-34.

Experimental Study on A New Type Viscous SMA-Damper

YU Qi-cai, LIU Ai-rong, YAO Yuan

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The superelasticity and hysteresis capability of NiTi shape memory alloy (SMA) wire at ordinary temperature were investigated, then the mechanical parameters of which were obtained. Based on the NiTi SMA wire and ordinary viscous damper product, a kind of new type SMA-viscous damper was designed and developed. In order to validate the relationship of loading frequency and those characteristic parameters as energy dissipation capacity, equivalent damping ratio and equivalent stiffness, the experimental study had been done on the new type SMA-viscous damper. From the experimental results, SMA-viscous damper designed has excellent energy dissipation capacity and is fit for the vibration control of long period structures.

Key words: shape memory alloy; viscous damper; SMA-viscous damper; energy dissipation