

赵亚哥白, 仵磊, 毛晨曦, 李素超, 李惠, 2010. 用于阻尼器结构不锈钢丝金属橡胶元件力学性能试验研究. 震灾防御技术, 5(3): 370—377.

用于阻尼器结构不锈钢丝金属橡胶元件 力学性能试验研究

赵亚哥白^{1,4)} 仵磊¹⁾ 毛晨曦²⁾ 李素超³⁾ 李惠³⁾

1) 吉林大学建设工程学院, 长春 130026

2) 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080

3) 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090

4) 东北林业大学, 哈尔滨 150040

摘要 为研究金属橡胶材料用作土木工程结构消能减震阻尼器的力学性能, 本文针对不同成型密度的金属橡胶阻尼元件, 分别在静力、动力荷载作用下进行了压缩性能试验, 测试加载幅值、循环加载次数、元件成型密度、动力加载频率等因素对金属橡胶元件阻尼耗能的影响规律。研究表明, 金属橡胶材料有着良好的弹性和阻尼特性, 其滞变耗能能力随着成型密度、加载幅值的增加而增大; 加载频率和加载次数对金属橡胶滞变性能几乎没有影响。

关键词: 金属橡胶 阻尼器 压缩 滞变性能

引言

阻尼器能有效地实现结构的消能减震, 目前由金属橡胶制成的阻尼器, 因其独特的干摩擦阻尼性能和良好的弹性性能, 在土木工程结构的消能减震结构中得到了较好的应用(李爱群, 2007)。金属橡胶(Metal Rubber, MR)是将金属丝卷成螺旋形, 经过编织、加压成型, 并经热处理而成的金属材料。它集优良的弹性与多孔性于一身, 有较大的可自回复弹性变形, 且具有阻尼大、重量轻、柔韧性好、吸收冲击能、不惧高低温作用、不易老化等特点。图1为双出杆型金属橡胶阻尼器, 由于在高低温、腐蚀环境等特种工况下均具有良好的隔振性能, 因此, 它在军事、航空航天、工程机械等领域均有应用(切戈达耶夫等, 2000; Tinker等, 1992; BSSC, 2004; 李惠等, 2003)。

作为金属橡胶阻尼减震装置的基础研究工作, 即研究金属橡胶材料用作阻尼器

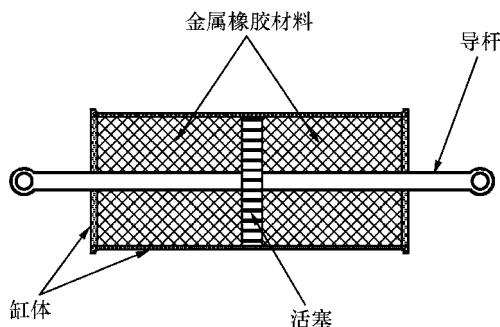


图1 双出杆型金属橡胶阻尼器

Fig. 1 Two-way pusher-over bar metal rubber damper

[收稿日期] 2010-03-26

[作者简介] 赵亚哥白, 男, 生于1979年。吉林大学建设工程学院在读博士研究生, 工作于东北林业大学土木工程学院, 讲师。E-mail: yagebai@sina.com

的力学性能，同时考虑到阻尼元件在工作时处于受压状态，因此，本文针对具有不同成型密度的金属橡胶制成的阻尼元件，分别进行了其在静力、动力荷载作用下的压缩性能试验，研究加载幅值、循环加载次数、动力加载频率等因素对金属橡胶元件阻尼性能的影响规律，为下一步系统建模提供依据，从而设计出适合特定工况下的具有最优参数的金属橡胶阻尼器。

1 试件材料、试验设备及试验工况

金属橡胶的弹性和阻尼特性与金属丝丝径、成型压力、后处理工艺等因数有关（Jiang等，2006；Jiang等，2001；Li等，2003；寇宏宁等，2006）。本试验用的金属橡胶元件采用1Cr18Ni9Ti的奥氏体不锈钢丝制成，丝直径0.2mm，螺旋卷外径1.7mm，试件制取采用编网方式，成型压力 $5t/cm^2$ ，采用400℃回火处理。按照不同的成型密度分别制造3个边长为25mm的立方体元件，其编号分别为OMR-I、OMR-II、OMR-III，3种元件的具体参数见表1，图2为元件照片。

表 1 金属橡胶试件参数

Table 1 Parameters of metal rubber specimens

试件	参数	丝径 (Mm)	成型密度 (g/mm^3)	质量 (g)	尺寸 (mm)
OMR-I		0.2	0.23	28	25x25x25
OMR-II		0.2	0.25	30	25x25x25
OMR-III		0.2	0.27	33	25x25x25

试验是在哈尔滨工程大学力学实验中心完成的，试验中分别采用INSTRON4505电子式万能材料试验机（图3）和INSTRON Fast Track TM8801电液伺服动力疲劳试验机（图4）对元件施加拟静力及动力循环荷载。其中，4505试验机最大静载拉压力100kN，最高加载速度500mm/min；8801试验机可实施精确正弦位移加载，最高振动频率50Hz，最大拉压力100kN。试验时采用控制试件变形的的方式施加荷载，由试验机上的力传感器和位移传感器采集力和位移的数据，并根据元件尺寸换算得到应力、应变。试验中对元件施加压缩荷载，测试其滞变性能。



图 2 金属橡胶元件

Fig.2 Metal rubber element



图 3 INSTRON4505 电子式万能材料试验机

Fig.3 INSTRON 4505 electronic universal material testing machine



图 4 INSTRON 8801 电液伺服动力疲劳试验机

Fig.4 INSTRON 8801 servo-hydraulic dynamic and fatigue testing machine

2 静力压缩试验及结果分析

2.1 试验工况

首先, 分别对 OMR-I、OMR-II 和 OMR-III 施加准静态循环压缩荷载, 加载方向沿金属橡胶成型受压方向。根据李惠等 (2003)、Jiang 等 (2006) 和 Jiang 等 (2001) 关于金属橡胶垫圈压缩试验的结果, 为了保证元件变形在可回复变形范围内, 本试验控制变形量在 6mm (24%) 以内。试验中分别以 2%、5%、10%、15%、20% 的应变幅值对元件单向定速压缩, 加载速率 5mm/min, 每种幅值循环加载 5 次。最后, 选取其中一个元件进行静力压缩破坏试验, 分别施加 30%、40% 的应变幅值, 测试其可回复变形。

2.2 试验结果与分析

图5 (a) — (c) 分别为元件 OMR-I、OMR-II 和 OMR-III 发生不同幅值应变时的应力-应变滞回曲线。从图5可以看出, 随着应变幅值的增大, 材料的弹性模量也随之增大, 曲线加载段表现出明显的应变硬化特征, 这一特性对于将金属橡胶材料开发为土木工程阻尼消能减震器是十分有利的, 可使阻尼器的回复力随着变形的增大而增大。此外, 随着变形幅值的增加, 金属橡胶的迟滞曲线更加饱满, 即材料具有更好的滞变耗能能力。这主要因为当变形较小时, 金属丝没有克服它们之间的摩擦力, 滑移不明显; 当变形幅值加大时, 金属丝间发生明显的滑移, 从而耗散了更多的能量。从图5还可以看出, 加卸载循环次数对金属橡胶元件的应力-应变滞变特性基本没有影响。每种工况下都只有第二圈应力-应变曲线相对于第一圈应力-应变曲线有微小的应力退化现象, 其后各圈加卸载应力-应变曲线都表现出很好的重复性, 表明随加卸载循环次数的增加, 金属橡胶阻尼元件受压应力-应变特性十分稳定。试验结果还表明, 金属橡胶材料具有很好的弹性, 且可回复应变大, 从试验结果可看出, 当应变幅值达到20%时, 依然没有残余变形。由此可见, 金属橡胶是用于制作结构减震阻尼装置的理想备选材料。

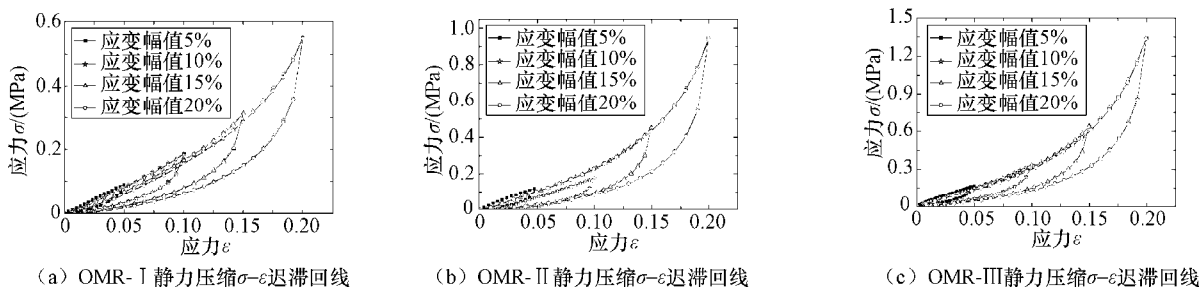


图5 元件静力压缩 σ - ε 迟滞回线

Fig. 5 σ versus ε curves of elements under static compression loading

为比较不同成型密度元件的阻尼性能, 分别计算试件 OMR-I、OMR-II、OMR-III 在不同应变幅值下等效阻尼比的数值 (表2)。等效阻尼比根据式 (1) 计算 (李爱群, 2007):

$$\zeta = \frac{W_D(a_0)}{4\pi W_S} \quad (1)$$

式中, $W_D(a_0)$ 为变形幅值 a_0 下迟滞回线围成的面积平均值; W_S 为结构最大弹性势能, $W_S =$

$\frac{1}{2}Ka_0^2$ ； a_0 为变形幅值； K 为等效刚度，取力-位移曲线起点与终点连线的直线斜率作为近似值，示意图如图6所示，即：

$$K = \frac{F_0}{a_0} \quad (2)$$

表 2 金属橡胶等效阻尼比 ζ

Table 2 Equivalent damping ratio of metal rubber

应变幅值		5%	10%	15%	20%
等效阻尼比 ζ	OMR-I ($\rho=0.23\text{g/mm}^3$)	0.039	0.037	0.032	0.026
	OMR-II ($\rho=0.25\text{g/mm}^3$)	0.055	0.044	0.037	0.028
	OMR-III ($\rho=0.27\text{g/mm}^3$)	0.059	0.045	0.038	0.033

由表 2 可知，在同一应变幅值时，等效阻尼比随着金属橡胶元件成型密度的增加而增大。

为分析元件成型密度对其阻尼性能的影响，图 7 给出了 OMR-I、OMR-II 和 OMR-III 应变幅值均为 20% 的应力-应变曲线的比较。从图 7 可以看出，随着金属橡胶材料成型密度的增大，材料弹性模量随之增大，因而对于相同的应变幅值，压缩应力也随之增大；根据 matlab 积分程序计算曲线包围的面积，得出 OMR-I、OMR-II、OMR-III 三种元件在应变幅值均为 20% 下的应力-应变滞迟回线包围的面积分别为 0.271、0.402、0.506，即面积值随成型密度的增加越来越大。因为材料成型密度越大，表明单位体积内的金属丝数量也越多，金属丝之间的摩擦力也就越大，加载卸载过程中因克服摩擦阻尼损耗的能量越来越多，元件阻尼性能增加。

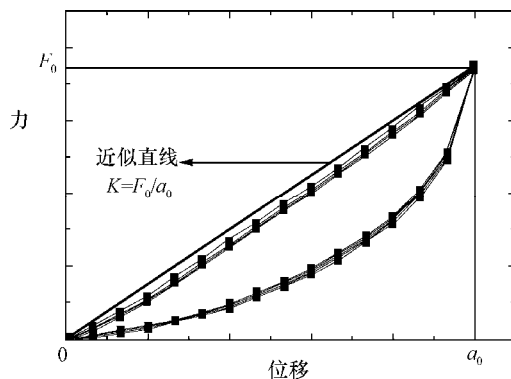


图 6 等效刚度计算示意图

Fig. 6 The equivalent linear stiffness

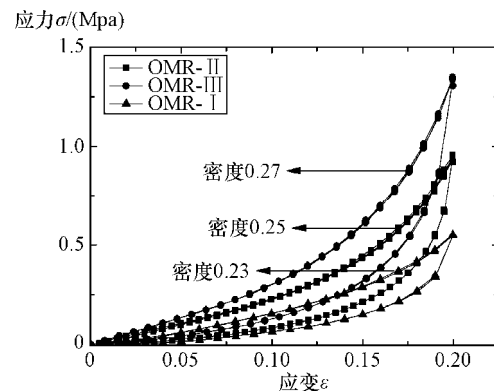


图 7 不同成型密度元件静力压缩 σ - ε 迟滞回线比较

Fig. 7 σ versus ε curves of elements with various nominal densities

3 动力压缩试验与结果分析

3.1 试验工况

对金属橡胶材料在不同幅值、不同频率循环动力荷载作用下的应力-应变滞变特性进行测试，具体测试工况：加载频率分别为 0.1Hz、0.5Hz、1Hz、3 Hz 和 5Hz，每种加载频率工况

下考虑 5 种应变幅值 5%、10%、15%、20%、30%，各工况循环加载 20 圈。

3.2 试验结果与分析

图8 (a)、(b)分别为OMR-I元件在加载频率为0.5Hz、3Hz、5Hz下，应变幅值为15%和20%时的单圈循环加载卸载应力-应变迟滞回线。从图8可以看出，在不同应变幅值下，加载频率对金属橡胶阻尼耗能性能均无显著影响。此外，循环加载次数和荷载幅值等因素对试件应力-应变关系的影响规律与准静态加载工况相同，在此不再赘述。

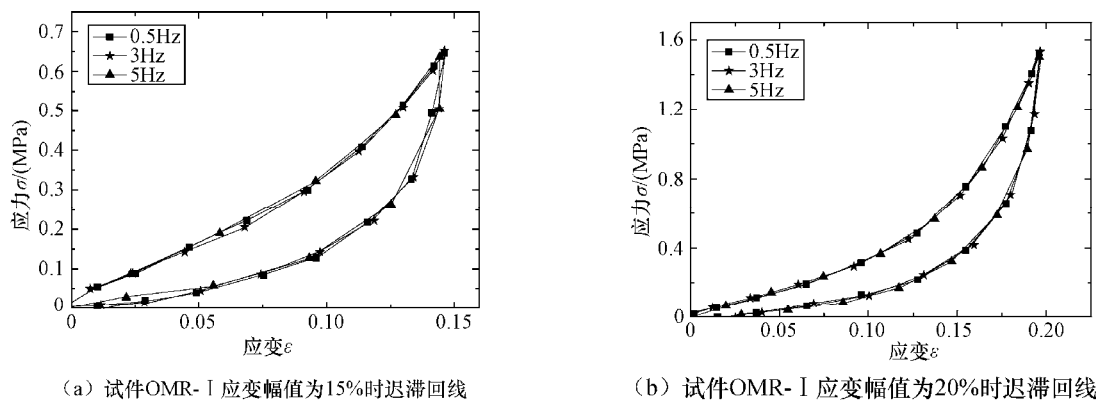


图 8 元件在不同频率下动力压缩 σ - ε 迟滞回线

Fig. 8 σ versus ε curves of elements under dynamic compression loading with various frequencies

3.3 静力加载与动力加载阻尼性能比较

为比较金属橡胶元件在准静态和动态加载工况下的阻尼性能，图9绘出了试件OMR-II(成型密度0.25)在准静态加载工况和动态加载工况下，应变幅值为20%的应力-应变曲线。从图9可以看出，在动力压缩循环荷载作用下，金属橡胶元件的最大应力比静力压缩时高。

图 10 给出了元件 OMR-II 分别在准静态荷载和动态荷载 (3Hz) 作用下，各应变幅值的等效阻尼比。从图 10 可以看出，尽管在动态荷载作用下应力-应变曲线的弹性应变能较大(因为动态荷载作用下等效刚度较大)，但由于此情况下元件耗能也较大，因此总体而言，在动态荷载作用下，阻尼元件的等效阻尼比大于其在准静态荷载作用下的阻尼比。

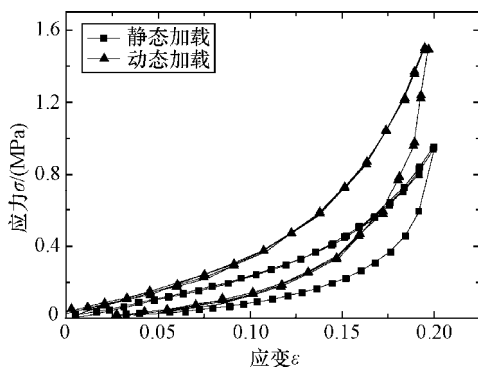


图 9 OMR-II 静力与动力压缩 σ - ε 迟滞回线比较

Fig. 9 σ versus ε curves of OMR-II under static and dynamic compression loading respectively

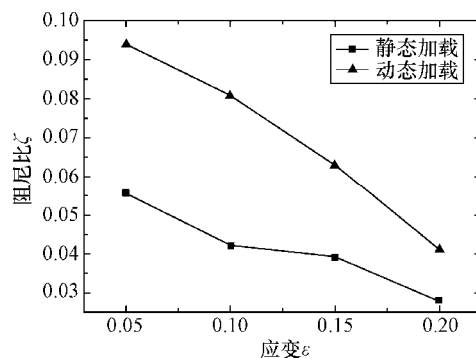


图 10 OMR-II 阻尼比随振幅变化的规律

Fig. 10 Equivalent damping ratio versus strain relationship of OMR-II under static and dynamic compression loading respectively

4 压缩破坏试验与结果

为测试金属橡胶不可恢复应变的限值，对 OMR-I 元件分别施加 30% 和 40% 的压缩应变，并分别循环加卸载 5 周。图 11 和图 12 分别为元件在应变幅值 30% 和 40% 时的应力-应变曲线。从图中可以看出，当应变幅值为 30% 时，元件没有明显的残余变形；而当应变幅值达到 40% 时，元件应变不能完全恢复，存在残余变形。试验表明，残余变形随着力的增加而逐渐增大。最后，编织元件的不锈钢丝材料会发生鼓胀甚至断裂等变形，OMR-I 试件呈“腰鼓”形破坏，如图 13 所示。经过测定，元件的残余应变约为 20%。

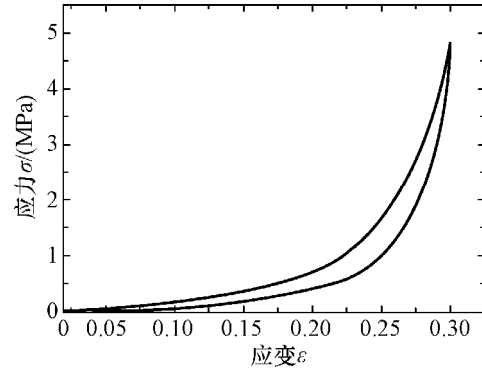


图 11 OMR-I 应变幅值为 30% 时“ σ - ε ”迟滞回线
Fig. 11 σ versus ε curves of OMR-I at 30% strain amplitude

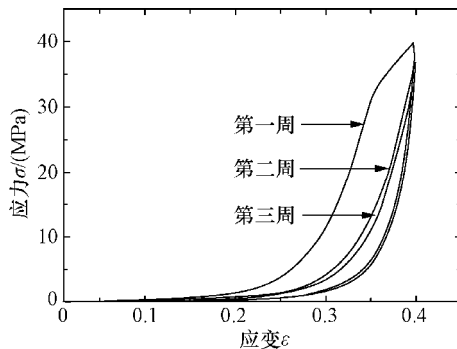


图 12 OMR-I 应变幅值为 40% 时“ σ - ε ”迟滞回线

Fig. 12 σ versus ε curves of OMR-I at 40% strain amplitude



图 13 元件压缩残余变形

Fig. 13 Residual deformation of elements under static compression loading

5 结论

本文针对不同成型密度不锈钢丝金属橡胶元件进行压缩试验，研究了其分别在静力和动力荷载作用下的压缩滞变性能，测试了荷载幅值、荷载循环次数、荷载频率等因素对不锈钢丝金属橡胶元件阻尼性能的影响。主要结论如下：

(1) 金属橡胶元件承受压缩变形时，在静力压缩荷载作用下，其滞变耗能能力随成型密度、变形幅值增加而增大，但加卸载循环次数对元件压缩滞变性能无明显影响。

(2) 在动力压缩循环荷载作用下，加卸载循环次数及应变幅值对元件滞变特性影响与静力荷载作用下相似，当加载频率大于 0.1Hz 后，动态加载频率对元件阻尼性能无影响；当加载幅值相同的情况下，在动力荷载作用下金属橡胶元件的最大应力和等效阻尼比均比静力压缩时高。

(3) 金属橡胶具有良好的阻尼耗能性能，可回复变形能力较大，变形限值在 30%—40% 之间，是制作阻尼减震装置的理想材料。

参考文献

- 寇宏宁, 刘国权, 杨建春等, 2006. 金属橡胶用 Cr-Ni-Mn 系不锈钢丝的微观组织及力学性能研究. 航空材料学报, **26** (4): 32—33.
- 李爱群, 2007. 工程结构减振控制. 北京: 机械工业出版社.
- 李惠, 毛晨曦, 2003. 新型 SMA 耗能器及结构地震反应控制实验研究. 地震工程与工程振动, **23** (1): 133—139.
- 切戈达耶夫, 穆柳金, 科尔特平编著, 李中郢译, 2000. 金属橡胶构件的设计. 北京: 国防工业出版社.
- BSSC, 2004. Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA450). Washington: FE-MA.
- Jiang Hongyuan, Zhang Ruihua, Xia Yuhong, 2006. Stationary dynamic characteristics analysis of new squeezed film damper. Chinese Journal of Mechanical Engineering, **19** (3): 442—445.
- Jiang Hongyuan, Ao Hongru, Xia Yuhong et al., 2001. Research on manufacturing technology and application of metal rubber. Mechanical Technologist, **35** (2): 35—36.
- Li Yuming, Zheng Jian, Bai Hongbai, 2003. Dynamic mechanical model of metal-rubber materials. Chinese Journal of Materials Research, **15** (5): 499—504.
- Tinker M.L., Cuthins M.A., 1992. Damping phenomenon in a wire rope vibration isolator. Journal of Sound and Vibration, **157** (1): 7—18.

Experimental Research on Mechanical Properties of Stainless Steel Metal Rubber Elements for Damper Structure

Zhao Yagebai^{1,4)}, Er Lei¹⁾, Mao Chenxi²⁾, Li Suchao³⁾ and Li Hui³⁾

1) College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China

2) Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

3) School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

4) Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract In order to investigate mechanical properties of stainless steel metal rubber that will be used as seismic reduction and energy dissipation with dampers in civil structures, metal rubber elements with various nominal densities tests were performed in this paper. Static and dynamic compression load were applied on the elements. The influence of several important factors was tested, which includes strain amplitude, cyclic number nominal density and frequency of loading on the damping energy dissipation of metal rubber. Our experimental results indicate that metal rubber has good elasticity and damping ability. With the increase of nominal density and strain amplitude, the metal rubber elements has larger energy dissipation capability. In contrast, Frequency and cyclic number of applied load have little influence on hysteretic properties of the metal rubber.

Key words: Metal rubber; Damper; Compression; Hysteretic property