

文章编号:1673-2049(2015)01-0096-08

# 超弹性 NiTi 形状记忆合金棒力学性能研究

庄 鹏<sup>1,2</sup>, 薛素铎<sup>3</sup>, 韦捷亮<sup>1,2</sup>, 刘雨冬<sup>1,2</sup>

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 工程结构与新材料  
北京高等学校工程研究中心, 北京 100044; 3. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

**摘要:**研制了具有 2 种化学成分的超弹性 NiTi 形状记忆合金(NiTi SMA)圆截面棒材,并对其进行  
了力学性能试验研究,分析了应变幅值、加载速率对 2 种 SMA 棒的应力-应变曲线以及等效刚度、  
单位循环耗能、等效阻尼比和残余应变等力学性能参数的影响。通过有限元软件对 SMA 棒的力  
学性能进行了数值模拟,并对比了有限元模拟结果与试验结果。结果表明:超弹性 SMA 棒可提供  
较大的输出力和良好的复位性能,适合作为复位部件及辅助耗能部件用于工程结构的减振控制;数  
值模拟结果和试验结果吻合较好,采用有限元方法可较为准确地模拟超弹性 SMA 棒的力学性能。

**关键词:**形状记忆合金棒;标准试件;超弹性;复位能力;力学性能

中图分类号:TU352.1

文献标志码:A

## Research on Mechanical Performance of Superelastic NiTi Shape Memory Alloy Bars

ZHUANG Peng<sup>1,2</sup>, XUE Su-duo<sup>3</sup>, WEI Jie-liang<sup>1,2</sup>, LIU Yu-dong<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture,  
Beijing 100044, China; 2. Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Structural Engineering  
and New Materials, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;  
3. School of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology,  
Beijing 100124, China)

**Abstract:** NiTi superelastic shape memory alloy (SMA) circular section bars with two types of  
chemical compositions were developed, and the mechanical performance tests were carried out.  
The influences of strain amplitude, loading rate on the stress-strain curve and the performance  
parameters such as equivalent stiffness, energy dissipation per cycle, equivalent damping ratio  
and residual strain of the two SMA bars were analyzed. The mechanical performance of SMA  
bars was simulated by finite element software, and the simulated results were compared with the  
test results. The results indicate that the developed superelastic SMA bars are suitable for the re-  
centring and supplementary energy dissipation components in seismic control due to their large  
output force and excellent superelastic effect. The numerical results agree well with the test  
results, and the finite element method can accurately simulate the mechanical performance of  
SMA bars.

**Key words:** shape memory alloy bar; standard specimen; superelasticity; re-centring property;  
mechanical performance

收稿日期:2014-10-28

基金项目:北京市自然科学基金资助项目(8132024);北京市优秀人才培养资助项目(2011D005017000006)

作者简介:庄 鹏(1976-),男,北京市人,讲师,工学博士,E-mail:zhuang\_peng@sina.com。

# 0 引 言

形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, 简称 SMA) 是一种新型功能材料,它具有独特的形状记忆效应和超弹性特性。超弹性是记忆合金材料的主要特性之一,即 SMA 产生较大的变形,在外力撤除后能够回复到变形前的形状,且应力-应变关系呈现非线性特征。值得注意的是,上述带有明显滞回特征的应力-应变曲线是由 SMA 内部固体相变过程所引起的,因此,不会导致材料的损伤。此外,SMA 还具有良好的抗腐蚀和抗疲劳特性。鉴于 SMA 具有的优良性能,其在几乎所有的工业领域均有研究与应用<sup>[1]</sup>。

SMA 在土木工程领域的研究始于 20 世纪 90 年代,Graesser 等<sup>[2]</sup>首先提出了将 SMA 用于工程结构隔震耗能的思想。随后,国际上兴起了研究 SMA 隔震、减振结构的热潮,各国学者提出了多种含有 SMA 丝材的隔震器和阻尼器<sup>[3-12]</sup>。近年来,随着材料科学与加工技术的进步,SMA 已不再局限于丝材,大尺寸 SMA 开始应用于结构耗能减振装置的研究<sup>[13-16]</sup>。

为了促进大尺寸 SMA 在土木工程结构中的应用,各国研究人员对其力学性能进行了一些试验研究。DesRoches 等<sup>[17]</sup>通过力学试验研究了超弹性 SMA 丝和 SMA 棒的受力性能,试验过程中 SMA 棒的最大拉伸应变幅值达到 0.06,该应变幅值对应的 SMA 棒的残余应变处于 0.002 0~0.007 3 范围内;商泽进等<sup>[18]</sup>对直径为 6 mm 的超弹性 SMA 棒进行了多种拉伸应变幅值(0.01~0.05)的力学试验研究,发现 SMA 棒在 0.05 应变幅值下的残余应变接近 0.015;任文杰等<sup>[19]</sup>开展了直径为 4.6 mm 的超弹性 SMA 棒在 0.007~0.028 拉伸应变幅值范围内的力学性能试验研究。以上研究表明,超弹性 SMA 棒在土木工程结构中具有一定的应用潜力,但是其力学性能仍然有待进一步提高。为了研制在大应变幅值下具有较小残余应变的高性能超弹性 SMA 棒,以拓展 SMA 在工程结构减振控制中的应用,本文采用 2 种具有近等原子比的中国产 NiTi 记忆合金材料研制圆截面棒材标准试件,并对其进行轴向拉伸试验研究,分析应变幅值(0.02~0.08)、加载速率(0.000 3~0.014 s<sup>-1</sup>)对 NiTi 记忆合金棒力学性能的影响。随后,利用有限元软件 ANSYS 对上述 2 种 SMA 试件的力学性能进行数值模拟,并将模拟结果与试验结果进行对比分析,最后,对该超

弹性 SMA 棒的力学性能特点进行综合评价。本文的研究可为中国产大尺寸 SMA 在工程结构中的应用研究提供基础数据。

# 1 试验概况

## 1.1 试验材料

北京有色金属研究总院有色金属材料制备加工国家重点实验室提供了 2 种 NiTi 记忆合金,分别命名为材料 A 和材料 B,其中,材料 A 的化学成分为 Ni<sub>50.8</sub> Ti<sub>49.2</sub> (下标数值表示原子比百分数,单位%),材料 B 的化学成分为 Ni<sub>51.0</sub> Ti<sub>49.0</sub>。对应于材料 A 和材料 B 的奥氏体相变结束温度分别为-12.3 ℃和-26.0 ℃,故在室温下 2 种 NiTi 记忆合金的初始状态均为奥氏体状态。对材料 A 和材料 B 进行冷轧制、高温热处理以及水淬冷却后,加工成 2 种圆截面棒材试件,分别命名为试件 A(材料 A)和试件 B(材料 B),2 种试件具有相同的尺寸:直径为 5 mm,标距为 30 mm,总长度为 60 mm,加工误差为±0.2 mm。试件各部分的尺寸与 SMA 棒试件分别如图 1,2 所示。

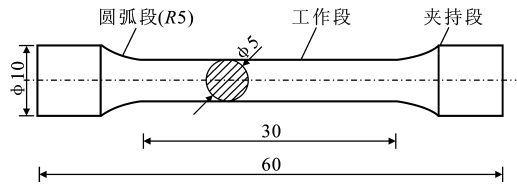


图 1 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of Specimen (Unit:mm)



图 2 SMA 棒试件

Fig. 2 SMA Bar Specimen

## 1.2 试验装置与试验工况

试验在 SANS 微机控制电子万能试验机上进行,试验装置如图 3 所示。试件的轴向拉力由力传感器测量,轴向变形由引伸计测量。为了防止 SMA 棒材在两端夹头处滑落或被挤压而产生碎裂,采用了棒材专用的具有螺纹状凹槽的夹具。试验采用等位移加载方式,加载的终止条件由引伸计应变控制,卸载的终止条件由力控制,测试结果由计算机自动采集。

在室温(约 25 ℃)状态下,对超弹性 SMA 棒试

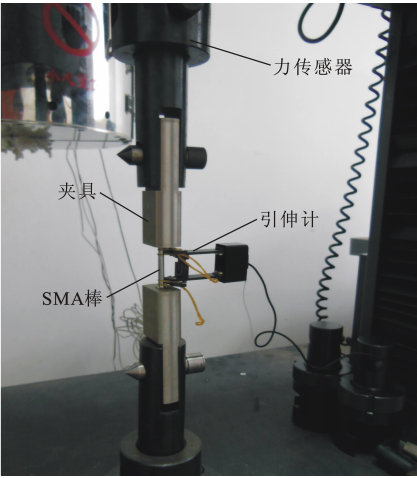


图3 试验装置

Fig.3 Experimental Setup

件进行轴向加卸载试验,考虑其力学性能随应变幅值、加载速率的变化规律,具体试验工况为:①应变幅值 $\epsilon$ 分别为0.02,0.04,0.06,0.08,加载速率为 $0.003\text{ s}^{-1}$ ,考察不同应变幅值对SMA棒试件力学性能的影响;②考虑地震作用下工程结构可能遇到的加载速率 $\dot{\epsilon}$ 范围( $0.000\ 25\text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 0.1\text{ s}^{-1}$ )<sup>[20]</sup>,选取其中的典型值0.000 3,0.003,0.01,0.014  $\text{s}^{-1}$ ,依次作为SMA棒试件的加载速率,不同加载速率下试件的应变幅值均为0.06。试验之前,2种SMA棒试件在0.06应变幅值下,以 $0.003\text{ s}^{-1}$ 加载速率拉伸循环20次,以保证记忆合金材料的力学性能达到稳定。

1.3 力学性能参数

为了分析各个工况下SMA棒的力学性能,定义力学参数如下:

(1)等效刚度 $K_{eq}$ 为

$$K_{eq} = \frac{\sigma_{max}}{\epsilon_{max}} \tag{1}$$

式中: $\sigma_{max}$ 为应力幅值; $\epsilon_{max}$ 为应变幅值。

(2)单位循环耗能 $W_d$ :SMA棒试件在加卸载一周时应力-应变曲线包围的面积,表示SMA材料每次加卸载循环的耗能能力。

(3)等效阻尼比 $\zeta_{eq}$ 为

$$\zeta_{eq} = \frac{W_d}{2\pi K_{eq} \epsilon_{max}^2} \tag{2}$$

(4)残余应变 $\epsilon_r$ :SMA棒试件卸载速率为0时的应变值,表示SMA棒试件的自复位能力。

2 试验结果及分析

2.1 应变幅值的影响

2种原子比的NiTi合金试件在不同应变幅值

条件下的应力-应变曲线如图4所示。试验之前,SMA棒试件已在加卸载速率为 $0.003\text{ s}^{-1}$ 、应变幅值为0.06的条件下循环加卸载训练20次。图5给出了上述2种NiTi合金试件在不同应变幅值条件下力学性能参数的分布曲线。

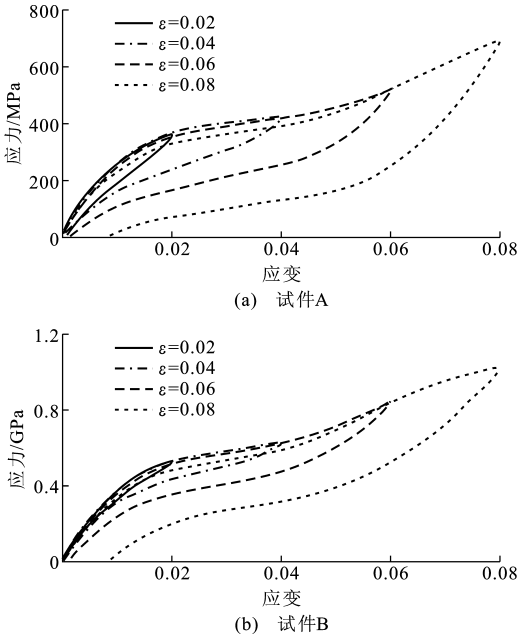


图4 不同应变幅值下SMA棒试件的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain Curves of SMA Bar Specimens Under Different Strain Amplitudes

由图4、5可以看出:在低应变幅值的状态下,SMA棒试件的应力-应变曲线呈梭形,没有明显的相变平台和相变点;随着应变幅值的增加,应力-应变曲线越来越饱满,当应变幅值达到0.06时,曲线比较饱满且带有较为明显的相变平台;随着应变幅值的增加,SMA棒试件的等效刚度逐渐降低,试件A的应变幅值从0.02增加到0.06时,其等效刚度降低幅度为51.9%,试件B的应变幅值从0.02增加到0.06时,其等效刚度降低幅度为48.3%,但在应变幅值达到0.04之后,2种试件等效刚度的降低幅度较小,表明SMA棒试件的等效刚度退化趋缓;随着应变幅值的增加,SMA棒试件的单位循环耗能成倍增加,试件A的应变幅值从0.02增加到0.06时,其单位循环耗能增加了7倍,试件B的应变幅值从0.02增加到0.06时,其单位循环耗能增加了11.3倍;随着应变幅值的增加,试件A、B的等效阻尼比均大致呈上升的趋势,其中,试件A的等效阻尼比在2.2%~5.0%之间,试件B的等效阻尼比在0.9%~3.9%之间;应变幅值小于0.06时,2种SMA棒试件的残余应变增加幅度很小,其值均小于

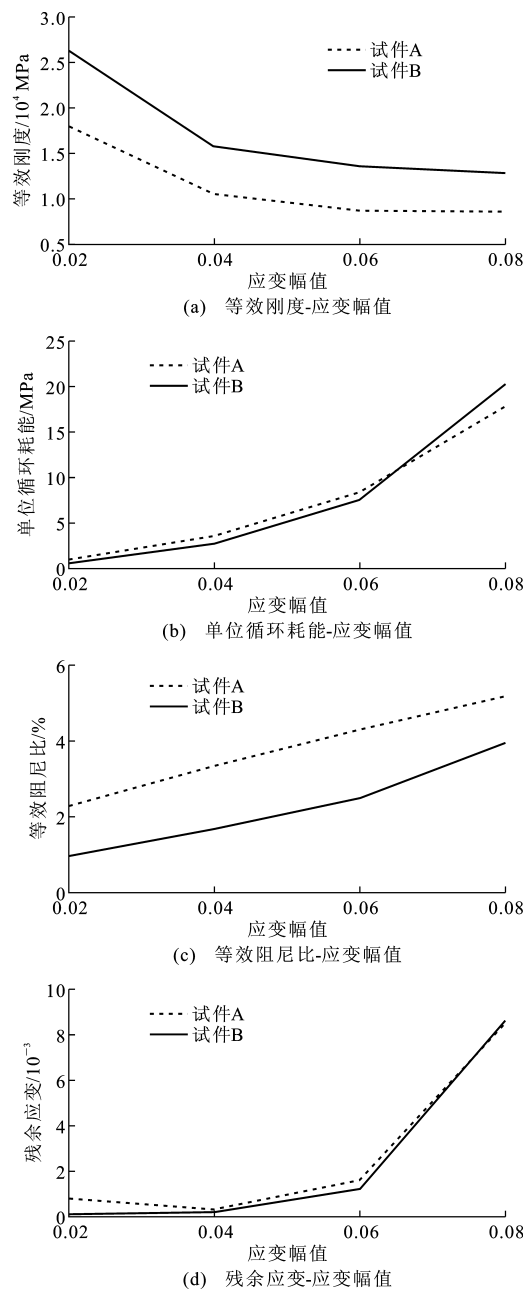


图 5 不同应变幅值下 SMA 棒试件的力学性能参数

Fig. 5 Mechanical Performance Parameters of SMA Bar Specimens Under Different Strain Amplitudes

0.002,此时 SMA 棒试件表现出良好的自复位能力,应变幅值超过 0.08 之后,2 种试件的应力-应变曲线均出现了明显的硬化,且残余应变增大。

### 2.2 加载速率的影响

在加载速率为  $0.003\text{ s}^{-1}$ 、应变幅值为 0.06 的条件下,针对 SMA 棒试件进行循环加卸载训练 20 次,之后开展不同加载速率下 SMA 棒试件的轴向拉伸试验,以考察加载速率对记忆合金棒力学性能的影响规律。图 6 给出了 2 种 SMA 棒试件在不同加载速率条件下的应力-应变曲线。图 7 为加卸载

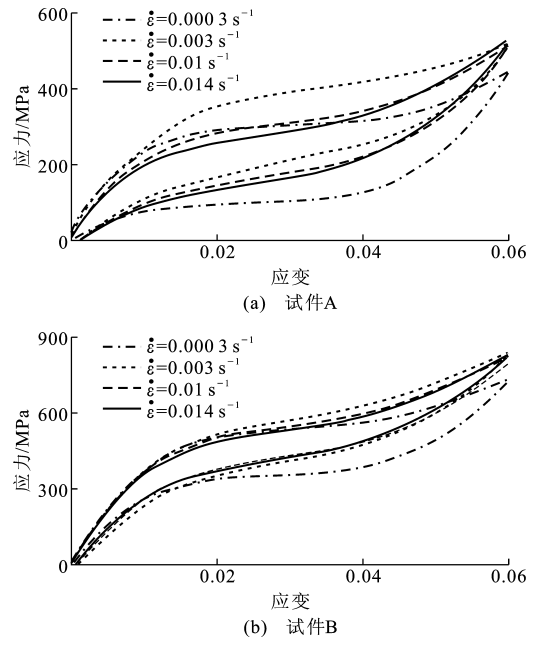


图 6 不同加载速率下 SMA 棒试件的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain Curves of SMA Bar Specimens Under Different Loading Rates

速率区间内 2 种试件力学性能参数的分布曲线。由图 6,7 可见:当加载速率较低时,2 种试件应力-应变曲线从弹性到相变过程的转变以及相变平台均较为明显,随着加载速率的增大,试件 A 和试件 B 在相变阶段的应力-应变曲线斜率均逐渐增加,且滞回曲线出现较明显的硬化;随着加载速率的增大,2 种 SMA 棒试件的等效刚度逐渐增加,且在低加载速率条件下等效刚度增加的幅度较大;随着加载速率的增大,2 种 SMA 棒试件的单位循环耗能逐渐降低,但降低的幅度不大;试件 A 和试件 B 的等效阻尼比均随加载速率的增大呈减小的趋势,当加载速率由  $0.0003\text{ s}^{-1}$  增加到  $0.014\text{ s}^{-1}$  时,试件 A 的等效阻尼比由 5.09%降低至 2.97%,减少了 41.65%,而试件 B 在相同条件下的等效阻尼比由 2.90%降低至 1.67%,减少了 42.41%;SMA 棒试件的残余应变随加载速率的增大有所增加,当加载速率由  $0.0003\text{ s}^{-1}$  增加到  $0.014\text{ s}^{-1}$  时,试件 A 的残余应变由 0.00048 增加至 0.00193,增加了约 3.0 倍,而试件 B 在相同条件下的残余应变由 0.00062 增加至 0.00136,增加了约 1.2 倍,但 2 种试件在高加载速率下的残余应变仍然处于较低的水平。

## 3 有限元分析

ANSYS 有限元分析软件提供了 SMA 的超弹性本构模型(Auricchio 本构模型),该模型共有 7 个

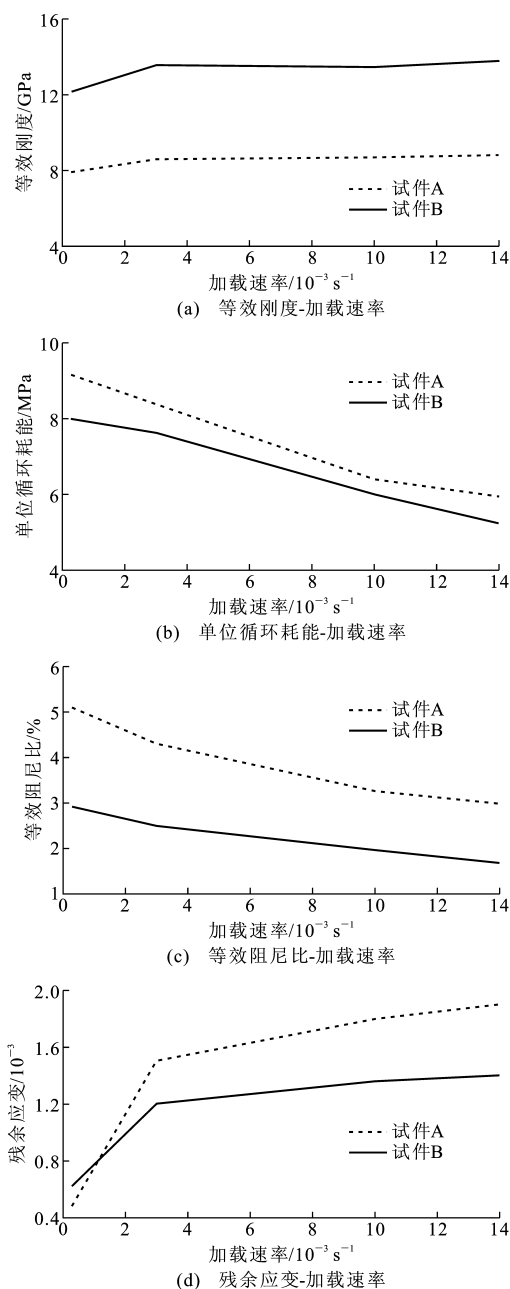


图 7 不同加载速率下 SMA 棒试件的力学性能参数

Fig. 7 Mechanical Performance Parameters of SMA Bar Specimens Under Different Loading Rates

模型参数:奥氏体弹性模量  $E_A$ ;正向相变开始应力  $\sigma_S^{AM}$ ;正向相变结束应力  $\sigma_F^{AM}$ ;逆向相变开始应力  $\sigma_S^{MA}$ ;逆向相变结束应力  $\sigma_F^{MA}$ ;最大可恢复相变应变量  $\epsilon_L$ ;拉压非对称因子  $\alpha_{ct}$ 。在 ANSYS 中,可以使用上述 SMA 本构模型的单元类型有 Plane182, Plane183, Solid185, Solid186 和 Solid187。

进行建模分析时,SMA 棒有限元模型的尺寸采用如图 1 所示的试件尺寸,并利用实体单元 Solid185 对模型进行单元划分,划分网格后的模型如图

8 所示。将模型一端设为固定约束,另一端施加位移荷载模拟 SMA 棒试件的轴向拉伸过程。本文以不同应变幅值下 SMA 棒的应力-应变曲线为例,分析 SMA 棒有限元模拟的可行性。通过应变幅值为 0.06 的应力-应变试验曲线,进行线性最小二乘拟合可识别出 SMA 超弹性本构模型参数,如表 1 所示。图 9 为 SMA 棒的轴向应变云图。由有限元模拟结果可见,SMA 棒的轴向变形主要发生在试件工作段,即试验中引伸计夹持的范围,表明 SMA 棒试件的传感器布置合理。

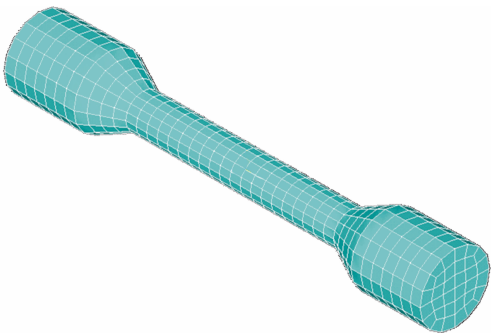


图 8 SMA 棒的有限元模型

Fig. 8 Finite Element Model of SMA Bar

表 1 有限元分析所使用的参数

Tab. 1 Parameters Selected for Finite Element Analysis						
试件编号	$E_A$ /GPa	$\sigma_S^{AM}$ /MPa	$\sigma_F^{AM}$ /MPa	$\sigma_S^{MA}$ /MPa	$\sigma_F^{MA}$ /MPa	$\epsilon_L$
A	29	310	530	320	130	0.045
B	40	470	780	550	264	0.040

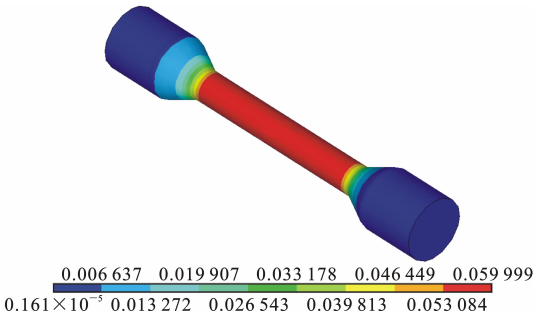


图 9 SMA 棒的轴向应变云图

Fig. 9 Contour of Axial Strain of SMA Bar

图 10 给出了不同应变幅值试验工况下 ( $\epsilon = 0.02, 0.04, 0.06$ ) NiTi 记忆合金棒试件的应力-应变关系曲线有限元模拟结果与试验结果的对比。由应力-应变模拟曲线和试验曲线得到的 SMA 棒力学性能参数如表 2~4 所示。通过对比分析可知:ANSYS 中的 SMA 模型能够较好地模拟 NiTi 合金棒的超弹性行为,根据 SMA 棒试件的应力-应变模拟曲线得到的力学性能参数值与试验结果之间的相

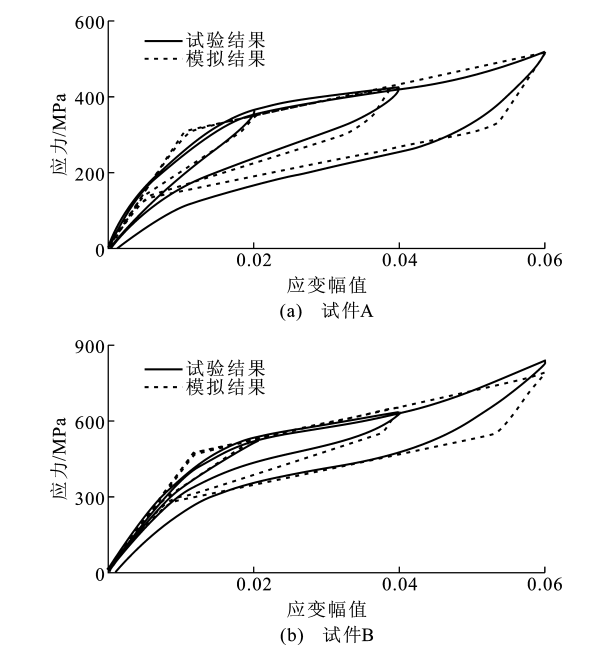


图 10 应力-应变曲线试验结果与模拟结果的比较

Fig. 10 Comparison of Experimental and Simulated Stress-strain Curves

表 2 等效刚度试验结果与模拟结果的比较

应变幅值	试件 A 等效刚度			试件 B 等效刚度		
	试验结果/MPa	模拟结果/MPa	相对误差/%	试验结果/MPa	模拟结果/MPa	相对误差/%
0.02	17 906.27	17 276.88	3.51	26 229.09	25 681.92	2.09
0.04	10 516.68	10 952.73	3.98	15 754.41	16 594.47	5.06
0.06	8 606.21	8 586.24	0.23	13 556.65	13 153.90	2.97

表 3 单位循环耗能试验结果与模拟结果的比较

应变幅值	试件 A 单位循环耗能			试件 B 单位循环耗能		
	试验结果/MPa	模拟结果/MPa	相对误差/%	试验结果/MPa	模拟结果/MPa	相对误差/%
0.02	1.02	0.95	6.86	0.63	0.68	7.35
0.04	3.52	3.50	0.57	2.64	3.13	15.65
0.06	8.35	7.96	4.67	7.60	8.57	11.32

表 4 等效阻尼比试验结果与模拟结果的比较

应变幅值	试件 A 等效阻尼比			试件 B 等效阻尼比		
	试验结果/%	模拟结果/%	相对误差/%	试验结果/%	模拟结果/%	相对误差/%
0.02	2.27	2.19	3.52	0.96	1.05	8.57
0.04	3.33	3.18	4.50	1.67	1.88	11.18
0.06	4.29	4.10	4.43	2.48	2.80	11.43

对误差绝大部分在 15% 以内;有限元模拟的误差与 SMA 棒试件的应力-应变曲线的相变平台和大应变下的非线性强化程度有关,在 2 种试件中,试件 B 的应力-应变曲线相变平台不够清晰,同时,其在大应变幅值下非线性强化较为明显,因此,与试件 A 的模拟结果相比,试件 B 的应力-应变曲线以及力学性能参数的有限元模拟结果与试验结果之间的误差偏大。总体来看,有限元模拟结果与试验结果吻合较好,说明采用有限元方法对 SMA 棒的超弹性力学性能进行数值模拟是可行的。

4 结 语

(1)研制的超弹性 NiTi 记忆合金棒的应变幅值在 0.02~0.06 的范围内可提供近似理想的应力-应变曲线,但是当 SMA 棒的应变幅值达到 0.08 时,其残余应变较为明显(0.08 应变幅值下的残余应变接近 0.01),SMA 棒的自复位能力有所下降。

(2)应变幅值和加载速率对 SMA 棒的力学性能有较为显著的影响。SMA 棒的等效刚度随应变幅值的增加而减少,单位循环耗能与等效阻尼比均随应变幅值的增大而增加;随着加载速率的增加,SMA 棒的等效刚度增大,单位循环耗能和等效阻尼比均减小;SMA 棒的残余应变随着应变幅值和加载速率的增加而增大。

(3)研制的 SMA 棒在 0.06 应变幅值下和高加载速率下能够提供小于 0.002 的残余应变,该值明显低于以往研究中 SMA 棒在相同试验条件下的残余应变值;同时,该 SMA 棒的输出力较大且具有一定的耗能能力,因此,本文中的 2 种 SMA 棒性能良好,适合用于结构减振控制装置自复位部件及辅助耗能部件的研发。

(4)有限元计算结果能够较为准确地反映 SMA 棒试件的超弹性力学特性,同时 SMA 棒试件的有限元模拟结果能够再现力学性能试验中难以观测到的现象,这表明采用有限元模拟的方法对 SMA 棒的力学性能进行分析是有效和必要的。

参考文献:

References:

[ 1 ] 杨大智. 智能材料与智能系统[M]. 天津:天津大学出版社,2000.  
YANG Da-zhi. Intelligent Materials and System[M]. Tianjin;Tianjin University Press,2000.

[ 2 ] GRAESSER E,COZZARELLI F. Shape Memory Alloys as New Materials for Aseismic Isolation[J].



- Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117 (11): 2590-2608.
- [3] DOLCE M, CARDONE D, MARNETTO R. Implementation and Testing of Passive Control Devices Based on Shape Memory Alloys[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29 (7): 945-968.
- [4] DOLCE M, CARDONE D, PONZO F, et al. Shaking Table Tests on Reinforced Concrete Frames Without and with Passive Control Systems[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2005, 34 (14): 1687-1717.
- [5] OZBULUT O, HURLEBAUS S. Optimal Design of Superelastic-friction Base Isolators for Seismic Protection of Highway Bridges Against Near-field Earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2011, 40(3): 273-291.
- [6] 李忠献, 陈海泉, 刘建涛. 应用 SMA 复合橡胶支座的桥梁隔震[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(2): 143-148.  
LI Zhong-xian, CHEN Hai-quan, LIU Jian-tao. Bridge Isolation with SMA-composite Rubber Bearing [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(2): 143-148.
- [7] 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 Chen-xi. 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.
- [8] 左晓宝, 李爱群, 黄 镇, 等. 超弹性 SMA 复合阻尼器的计算模型及参数分析[J]. 振动工程学报, 2005, 18(2): 161-166.  
ZUO Xiao-bao, LI Ai-qun, HUANG Zhen, et al. Mechanical Model and Parameter Analysis of Superelastic SMA Compound Damper[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(2): 161-166.
- [9] 薛素铎, 董军辉, 卞晓芳, 等. 一种新型形状记忆合金阻尼器[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 45-50.  
XUE Su-duo, DONG Jun-hui, BIAN Xiao-fang, et al. A New Type of Shape Memory Alloy Damper [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 45-50.
- [10] 王社良, 赵 祥, 朱军强, 等. 含形状记忆合金自复位阻尼器隔震结构的地震反应分析[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(5): 110-117.  
WANG She-liang, ZHAO Xiang, ZHU Jun-qiang, et al. Earthquake Response Analysis of Isolated Structure with Shape Memory Alloy Re-centering Dampers [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27 (5): 110-117.
- [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 Hong-nan, REN Wen-jie, et al. Experimental Investigation of an Innovative Hybrid Shape Memory Alloys Friction Damper [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 58-64.
- [12] 任文杰, 李宏男, 宋钢兵, 等. 新型自复位 SMA 阻尼器对框架结构减震控制的研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(6): 14-20.  
REN Wen-jie, LI Hong-nan, SONG Gang-bing, et al. Study on Seismic Response Control of Frame Structure Using Innovative Re-centering SMA Damper [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 14-20.
- [13] 余志刚, 韩 西, 钟 厉, 等. 预应变影响下形状记忆合金约束混凝土圆柱体轴压试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 124-129.  
YU Zhi-gang, HAN Xi, ZHONG Li, et al. Axial Compression Experiment on Concrete Circular Columns Confined with Shape Memory Alloy Under Influence of Pre-strain Conditions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 124-129.
- [14] BHUIYAN A, ALAM M. Seismic Vulnerability Assessment of a Multi-span Continuous Highway Bridge Fitted with Shape Memory Alloy Bars and Laminated Rubber Bearing [J]. Earthquake Spectra, 2012, 28(4): 1379-1404.
- [15] 陈 鑫, 李爱群, 丁幼亮, 等. 空间网架结构形状记忆合金隔震研究[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 86-93, 101.  
CHEN Xin, LI Ai-qun, DING You-liang, et al. Study on Isolation of Space Grid Structure Using Shape Memory Alloy [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27 (9): 86-93, 101.
- [16] 何小辉. 钢框架新型耗能梁柱节点滞回性能的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
HE Xiao-hui. Hysteretic Behavior of New Energy-dissipated Beam-to-column Connections in Steel Frame [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [17] DESROCHES R, MCCORMICK J, DELEMONT M. Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(1): 38-46.
- [18] 商泽进, 王忠民, 尹冠生, 等. 超弹性 TiNi 形状记忆合

金棒材力学行为[J]. 稀有金属材料与工程,2009,38(3):460-464.

SHANG Ze-jin,WANG Zhong-min,YIN Guan-sheng, et al. An Experimental Study on the Mechanical Behavior of Superelastic TiNi Shape Memory Alloy Bars [J]. Rare Metal Materials and Engineering,2009,38(3):460-464.

[19] 任文杰,王利强,贾俊森,等. 超弹性形状记忆合金棒力学性能的实验研究[J]. 功能材料,2013,44(2):258-261.

REN Wen-jie,WANG Li-qiang,JIA Jun-sen, et al. Experimental Study on Mechanical Behavior of Superelastic Shape Memory Alloy Bar[J]. Journal of Functional Materials,2013,44(2):258-261.

[20] 李 敏,李宏男. 建筑钢筋动态试验及本构模型[J]. 土木工程学报,2010,43(4):70-75.

LI Min,LI Hong-nan. Dynamic Test and Constitutive Model for Reinforcing Steel[J]. China Civil Engineering Journal,2010,43(4):70-75.

## 第 199 场中国工程科技论坛暨第八届全国防震减灾工程学术研讨会在广州召开

2014 年 12 月 19~20 日,由中国工程院主办,中国土木工程学会、中国工程院土木、水利与建筑工程学部、中国土木工程学会防震减灾工程技术推广委员会、广州大学等单位承办的“第 199 场中国工程科技论坛暨第八届全国防震减灾工程学术研讨会”在广州隆重召开。中国工程院副院长徐德龙院士、广州市副市长王东、中国土木工程学会副理事长刘士杰、广州大学校长邹采荣、广州大学工程抗震研究中心周福霖等领导专家分别代表主办单位、地方政府、学会、承办单位以及会议学术委员会出席了开幕式并发表致辞。周福霖、王景全、谢礼立、江欢成、王梦恕、聂建国、杜彦良、欧进萍、秦顺全 9 位院士及近 500 位专家学者参加了本次会议,其中周福霖、王景全、欧进萍、江欢成、聂建国 5 位院士做了主题报告。在 2 天会期里,还有近 20 位以长江学者、国家杰出青年基金获得者、国家千人计划获得者为代表的土木工程领域知名学者做了精彩的大会报告;近 50 位中青年土木工程科研工作者们以分组报告形式进行了学术交流与探讨。

会议不仅邀请了国内地震工程与结构工程领域众多院士、著名学者、知名科研机构及大型央企国企领导出席,也安排了减震控制领域知名信誉企业进行产品展示与技术宣传,有效地将学术研究与产品研发的交流结合起来。会议议程编排合理,从院士到学生,从资深前辈到新生力量,各层次梯队学者精英均有所发声,有所展示,真诚交流,友好互动,求同存异;会议报告内容丰富,涉及了建筑、桥梁、工业建筑、村镇建筑、海洋结构、核电站、古建筑、特种结构等各大工程领域,汇集了抗震、隔震、减震、控制、监测等地震工程主要研究方向,涵盖了理论分析、试验研究、仿真模拟、设计理论及工程应用等所有工程环节。会议展现了我国地震工程领域前沿热点研究内容和最新的研究成果,反思了我国土木工程领域存在的突出问题与顽固症结,指出了我国地震工程与土木工程今后的前进方向与发展构想,明确了地震工程与土木工程工作者们的使命与责任,起到了促进防震减灾技术与土木工程学科发展的积极作用,达到了预期目标。