

新形式超弹性形状记忆合金线材力学性能试验研究

崔迪¹, 李宏男^{*1,2}, 宋钢兵^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 美国休斯敦大学 机械工程系, 美国 休斯敦 77204)

摘要: 超弹性是形状记忆合金(SMA)的重要特性之一。鉴于钢绞线在力学性能上的优势, 提出一种新形式的SMA线材——SMA绞线, 其目的在于将其埋设到土木工程领域的混凝土构件中。通过试验, 主要研究了应变幅值和加卸载循环次数对普通圆截面SMA丝材和SMA绞线的应力诱发马氏体相变应力、残余应变、最大相变应变和耗能能力的影响。研究结果表明, SMA绞线比SMA丝具有更好的力学性能。建议在工程应用中将SMA的线材形式作为一项影响其超弹性力学性能的因素。

关键词: 形状记忆合金; 超弹性; 循环加载试验; 力学性能

中图分类号: TU311; TB381 **文献标识码:** A

0 引言

地震和风给人们带来了严重的灾害, 采取经济、高效、可靠的措施减小地震和风荷载造成的损失, 已成为科学家和工程师们热衷研究的课题^[1]。20世纪80年代, 美国最先出现了智能材料结构的概念^[2]。智能材料与结构已开始逐渐在结构振动控制领域获得广泛应用, 在某种程度上解决了传统材料的一些弊端, 对振动控制研究的深入发展起到了积极的作用。形状记忆合金(shape memory alloy, 简称SMA)是一种兼有感知和驱动功能的重要智能材料, 对它的研究和应用始于20世纪60年代, 经过40多年的发展, SMA已广泛应用于航空航天、机器人和医疗等精密尖端领域。SMA因具有抗疲劳性能好、可以实现多种变形形式、易于同混凝土和钢等材料相结合等优点而日益受到土木工程界的重视。与普通材料相比, 它具有独特的形状记忆效应和超弹性, 利用这两个特性可以实现对结构的主被动控制^[3]。

超弹性是SMA最重要的力学性能之一。近几年来, 国内外一些学者^[4-10]对SMA的超弹性

力学性能进行了广泛深入的研究, 主要探讨了温度、加载速率(或频率)、应变幅值和循环次数等因素对超弹性SMA的耗能能力、相变应力、残余变形以及弹性模量等有关力学性能参数的影响。随着研究工作的进一步深入, 超弹性SMA线材的截面尺寸对其力学性能的影响也日益得到重视。Lagoudas等^[11]采用直径为1.78 mm和2.16 mm的丝材研究了尺寸效应对超弹性SMA力学性能的影响, 研究表明, 直径大的丝材比直径小的丝材具有较稳定的滞回环、平滑的屈服平台, 但残余变形比直径小的丝材大一些。McCormick等^[12]主要研究了尺寸、加载速率和应变幅值对SMA阻尼性能的影响, 试验采用了直径为25.4 mm的超弹性SMA棒材, 更贴近实际工程应用, 研究表明尺寸的增大会降低SMA的耗能能力。

尽管对超弹性SMA力学性能的研究已经考虑了众多影响因素, 但绝大多数研究工作采用的都是圆形截面的SMA丝材或棒材, 材料的形式较为单一。迄今为止, 还未有研究人员就SMA线

收稿日期: 2005-10-20; 修回日期: 2007-02-04.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(50025823); 海外青年学者研究基金资助项目(50328807).

作者简介: 崔迪(1978-), 女, 博士生; 李宏男*(1957-), 男, 博士, 教育部长江学者奖励计划特聘教授; 宋钢兵(1968-), 男, 博士, 美国休斯敦大学终生副教授.

材的组成形式对其力学性能所产生的影响进行研究报道。鉴于钢绞线在力学性能上的一些优势,本文提出一种新形式的 SMA 线材—— SMA 绞线,并了解这种新的形式对 SMA 力学性能的影响,以及这种 SMA 绞线在使用过程中的可靠性。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验采用的两种 SMA 成分相同,横截面积相等,但形式不同。一种为普通的圆截面 SMA 丝材,直径 2 mm(图 ①);另一种为 SMA 绞线,该绞线由 7 根单丝直径为 0.75 mm 的 SMA 丝扭成(图 ②)。对两种形式的 SMA 进行了差示扫描量热法(differential scanning calorimeter,简称

DSC)测试,测试结果如图 2 所示。图中,上部曲线表示材料从奥氏体相向马氏体相转变的过程,下部曲线表示材料从马氏体相向奥氏体相转变的过程; t_o 和 t_c 分别表示相变开始和相变结束温度。表 1 给出了两种形式的 SMA 的相变温度。

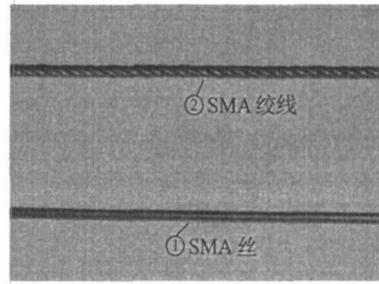


图 1 SMA 试样
Fig. 1 SMA specimens

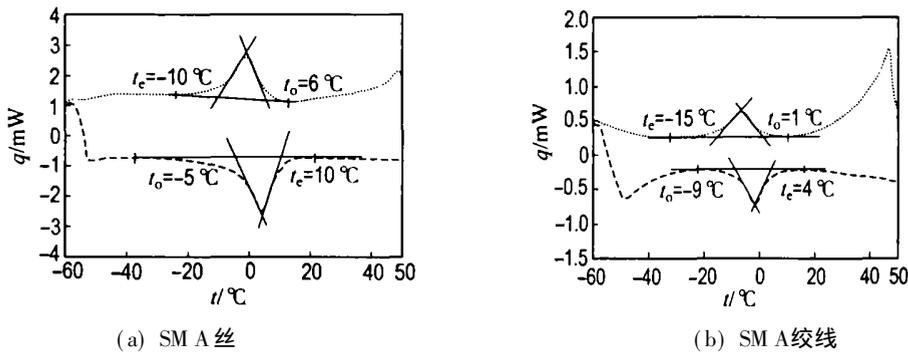


图 2 DSC 分析结果
Fig. 2 Results of differential scanning calorimeter (DSC)

表 1 SMA 的相变温度
Tab. 1 Phase transformation temperature of SMA

材料	相变温度 /°C			
	M_f	M_s	A_s	A_f
SMA 丝	- 10	6	- 5	10
SMA 绞线	- 15	1	- 8	4

1.2 试验设备

试验设备采用深圳新三思材料检测有限公司生产的 CMT5105 型万能试验机。试验时采用 10 kN 的力传感器测量力,采用标距为 50 mm 的引伸计测量变形(见图 3)。试验数据通过计算机自动采集,采样频率为 32 Hz

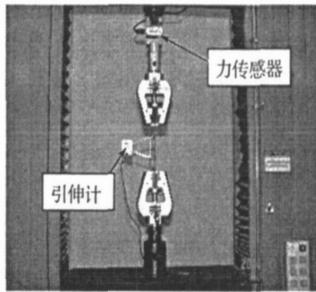


图 3 试验设备
Fig. 3 Setup of experiment

1.3 试验步骤及加载方式

(1) 试验前, 将长度为 180 mm 的试样在冰水和沸水中各放置 1 min, 并进行 10 次这样的冷热循环以稳定 SMA 丝的性能. 同时, 最后一次从沸水中取出后, 使试样自然冷却到室温条件, 这样保证了 SMA 能完全处于奥氏体相状态. (2) 对材料进行变应变幅值拉伸试验, 应变幅值从 1% ~ 8%, 以此来了解应变幅值对 SMA 力学性能的影响. (3) 对材料进行等应变幅值循环加载试验, 参考步骤 (2) 的试验结果, 设定循环加载试验的应变幅值分别为 1%、2%、3%、4% 和 5%, 各应变幅值下循环次数为 40 次. 本次研究中所设计的 SMA 绞线将被用于混凝土构件中, 对混凝土的裂缝起控制作用, 所以设定应变幅值并不大. 试验过程中, 采用的应变速率为 2% / min. 试验室温度为 20℃.

2 试验结果及分析

2.1 参数规定

图 4 给出了超弹性 SMA 一个加卸载循环的典型应力-应变关系曲线简图, 图中 ϵ_{Ms} 、 ϵ_{Mp} 、 ϵ_{As} 、 ϵ_{Ap} 分别为马氏体相变开始和相变结束、奥氏体相变开始和相变结束时对应的应力; ϵ_u 相当于极限抗拉强度; X_{res} 为残余应变; X 为加载时的最大相变应变, 即屈服平台的长度; X_s 为极限拉应变. ΔW 表示超弹性 SMA 在一个加卸载循环内

损耗的能量; W 为超弹性 SMA 在一个加卸载循环内的总的应变能. 这样, 等效阻尼比 $a_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W}$. 试验结果分析中, 力学参数的取值就是按照上述规定得到的.

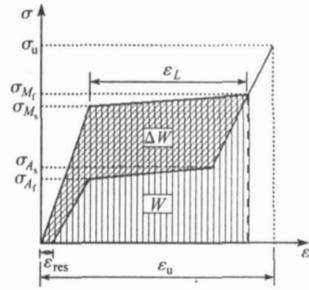


图 4 超弹性 SMA 的应力-应变关系曲线简图
Fig. 4 Stress-strain curve of superelastic SMA

文中考虑了应变幅值和循环次数对 ϵ_{Ms} 、 X_{res} 、 X_s 、 ΔW 和 a_{eq} 的影响.

2.2 应变幅值对力学性能的影响

在不同应变幅值条件下, 两种超弹性 SMA 的拉伸试验结果如图 5 所示. 从中可以看出, SMA 丝的应力-应变关系曲线比 SMA 绞线的应力-应变关系曲线光滑一些. 随着应变幅值的增大, 加载段屈服平台的高度基本不发生变化; SMA 丝的卸载段屈服平台高度下降较快, 而 SMA 绞线的卸载段屈服平台高度变化不明显.

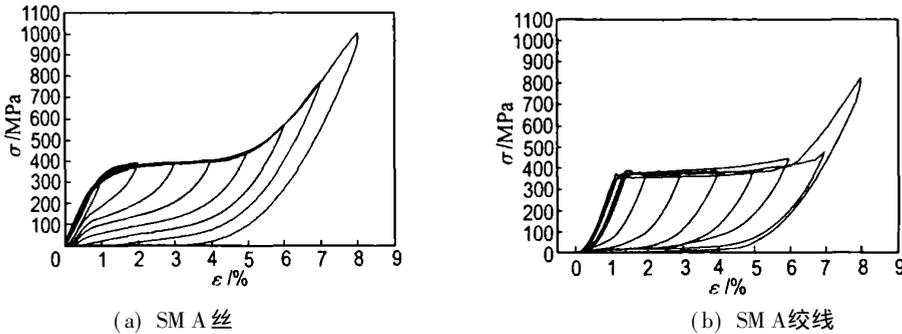


图 5 不同应变幅值条件下超弹性 SMA 的应力-应变关系曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of superelastic SMA under different strain amplitude

图 6(a) ~ (e) 分别给出了不同应变幅值条件下, 两种超弹性 SMA 的 ϵ_{Ms} 、 X_{res} 、 X_s 以及 ΔW 和 a_{eq} 的变化曲线. 从图 6(a) 可以看出, SMA 绞线的 ϵ_{Ms} 比 SMA 丝的 ϵ_{Ms} 略大一些; 且两者的 ϵ_{Ms} 随应变幅值的增大而发生的变化不超过 9%, 可以认为 ϵ_{Ms} 不随应变幅值的变化而变化. 图 6(b) 给出了应变幅值对两种 SMA X_{res} 的影响, X_{res} 随着应变幅值的增大而增大. 当应变幅值小于 4% 时,

两种 SMA 的 X_{res} 基本相同, 不超过应变幅值的 1/12; 应变幅值超过 4% 之后, SMA 丝的 X_{res} 迅速增大, 而 SMA 绞线在应变幅值为 6% 时, 却出现了负应变, 这是由于 SMA 绞线在大应变幅值条件下, 卸载过程中出现散捆现象而引起的. 但总的来说, 应变幅值较大时, SMA 绞线的 X_{res} 要小于 SMA 丝的 X_{res} . 最大相变应变 X_s 与应变幅值之间的关系见图 6(c). 对于 SMA 丝, 应变幅值较小

时, $\bar{\sigma}_L$ 随着应变幅值的增大而增大; 应变幅值大于 3% 后, 开始出现马氏体弹性阶段, 因此, 尽管应变幅值继续增大, SMA 丝的 $\bar{\sigma}_L$ 却几乎不变. 而对于 SMA 绞线, 应变幅值大于 6% 后, 才开始出现马氏体弹性阶段, 因此 $\bar{\sigma}_L$ 在应变幅值小于 6% 时近似于线性增长. 从图 6(d)、(e) 中可以看到, 随着应变幅值的增大, 两者的 ΔW 都逐渐增大, 且增长趋势基本相同; 在中等应变幅值条件下, 绞线型 SMA 的 ΔW 要大于直线型 SMA 的 ΔW . 两种超弹性 SMA 的 a_{eq} 都随着应变幅值的增大先减小后增大, 这是因为应变幅值较小时, 材料的塑性变形

很小, ΔW 增加得很少, 而应变能 W 却迅速增加, 所以出现了 a_{eq} 随着应变幅值的增大而减小的现象; 当应变幅值增大到一定程度后, ΔW 的增加超过了 W 的增加, 导致 a_{eq} 随着应变幅值的增大而增大. SMA 丝的 a_{eq} 在应变幅值超过 6% 以后稳定下来; SMA 绞线的 a_{eq} 在应变幅值超过 4% 后就稳定了, 应变幅值为 8% 时, a_{eq} 突然下降也是由于 SMA 绞线卸载时发生散捆现象导致测得应力-应变关系曲线失真引起的. 在中等应变幅值条件下, SMA 绞线的 a_{eq} 要比 SMA 丝的 a_{eq} 大 1% ~ 2%.

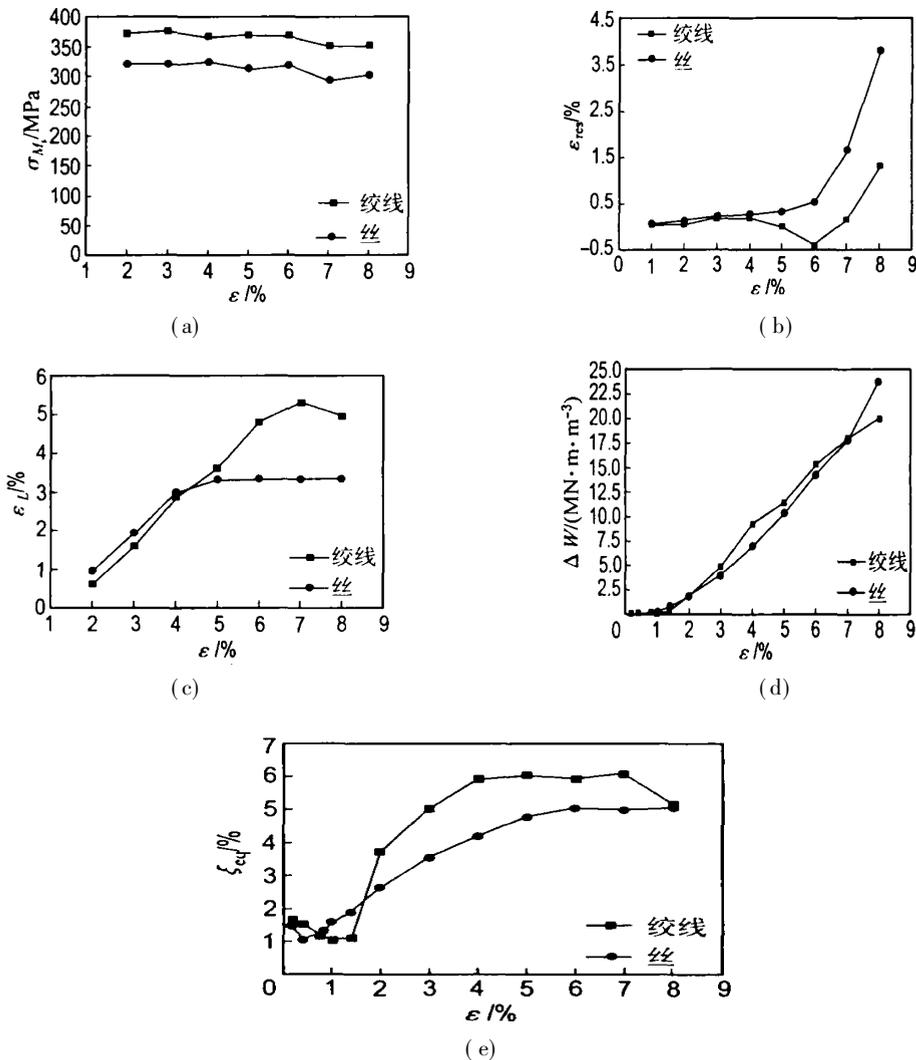


图 6 应变幅值对 SMA 力学性能的影响

Fig. 6 Effects of strain amplitude on the mechanical properties of SMA

2.3 循环次数对力学性能的影响

通过上述的变幅值拉伸试验了解到, 当应变幅值较大时, SMA 绞线会发生散捆现象, 导致试验得到的力学性能失真. 此外, 考虑到设计的 SMA 绞线将被应用到混凝土构件中, 当构件发生

变形时, SMA 绞线也随之产生变形, 但变形不会太大. 所以选取应变幅值为 3% 时的试验结果 (如图 7) 讨论循环次数对 SMA 力学性能的影响情况. 从图中可以看出, 随着循环次数的增加, 滞回曲线逐渐变光滑. 两种超弹性 SMA 的上屈服

平台(即奥氏体相向马氏体相转变过程)都是在循环次数超过 25 次之后基本上保持不变;而循环次数超过 5 次后下屈服平台(即马氏体相向奥氏体相转变过程)就稳定了, SMA 丝要比 SMA 绞线的下屈服平台高. 由图 7(b)可知,对于 SMA

绞线,应力-应变关系曲线在应变小于 0.5% 时,应力增加得并不明显,而 SMA 丝(图 7(a))并不出现这样的现象,这是由于组成 SMA 绞线的单丝之间存在一定的空隙.

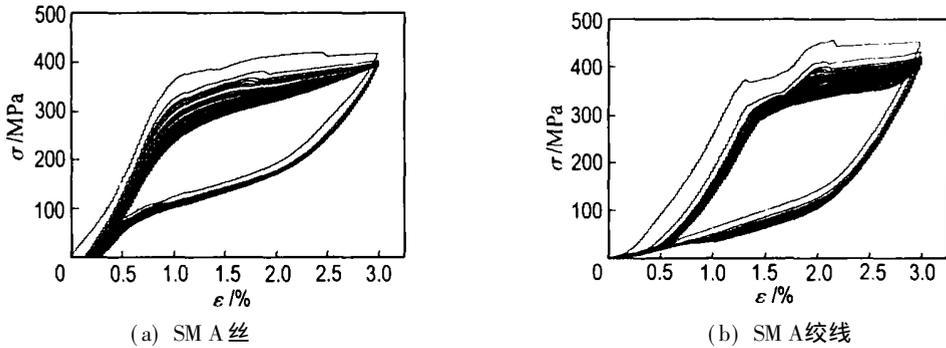


图 7 循环加载条件下超弹性 SMA 的应力-应变关系曲线(应变幅值 3%)

Fig. 7 Stress-strain curves of superelastic SMA under cyclic loading (strain amplitude 3%)

图 8(a)~ (e)分别给出了两种超弹性 SMA 的 σ_{M_s} , X_{res} , X_{eq} 以及 ΔW 和 a_{eq} 随循环次数 N 增加的

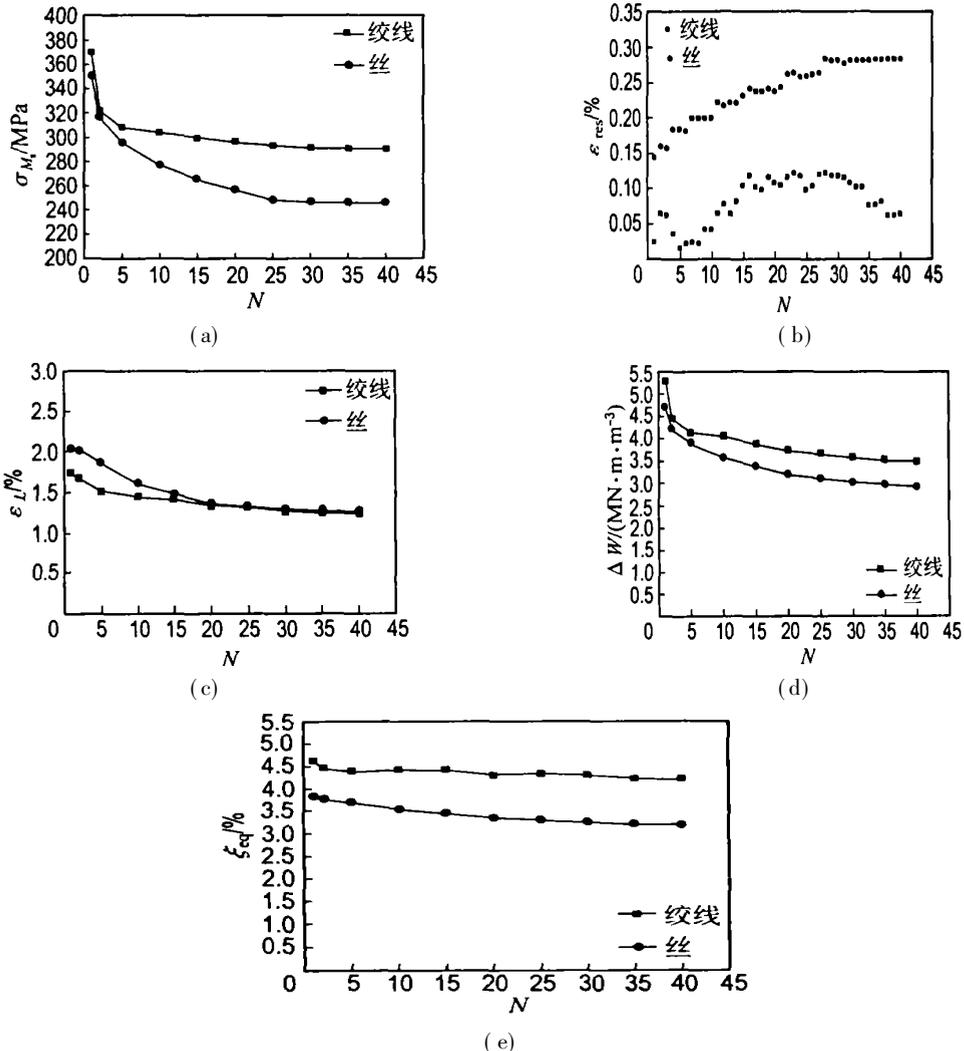


图 8 应变幅值为 3% 时循环次数对力学性能的影响

Fig. 8 Effects of cyclic number on the mechanical properties of SMA under 3% strain amplitude

变化情况. 随着循环次数的增加, 两种超弹性 SMA 的 ϵ_{M_s} 都逐渐减小 (图 8(a)). 循环次数小于 5 时, ϵ_{M_s} 急剧下降; 当循环次数大于 25 后, ϵ_{M_s} 趋于稳定, 稳定后 SMA 绞线的 ϵ_{M_s} 比 SMA 丝的 ϵ_{M_s} 大了将近 60 MPa. 图 8(b) 给出了 X_{res} 随循环次数的变化情况, SMA 绞线的 X_{res} 一直都小于 SMA 丝的 X_{res} . SMA 丝的 X_{res} 随循环次数的增大逐渐增大, 而 SMA 绞线的 X_{res} 随着循环次数的增加出现了先减小后增大再减小的现象. 这是由于 SMA 绞线的表面不光滑, 引伸计夹持到其上后最初的几个循环内会有一个适应的过程, 而当循环次数增大到一定程度后, SMA 绞线出现了散捆现象, 使得单丝之间发生相对滑移, 造成 X_{res} 的减小. 随着循环次数的增加, 两种超弹性 SMA 的 X 都逐渐减小 (图 8(c)), SMA 丝减小得快一些, 当循环次数超过 20 后, 两者的 X 基本相同. 出现上述力学性能变化的原因是由于加卸载过程中材料内部位错密度的增加引起了 X_{res} 的出现, X_{res} 的增加引起内应力的增加^[13]. 内应力就等于 ϵ_{M_s} 的变化量, 它促进了马氏体的形成, 因此 ϵ_{M_s} 就会随着循环次数的增加而减小^[8]. 由图 8(d)、(e) 可知, 随着循环次数的增加, 两种超弹性 SMA 的 ΔW 和 a_{eq} 都逐渐减小, 但 a_{eq} 的变化并不明显. 当循环次数超过 30 次后, 耗能能力趋于稳定, 而且 SMA 绞线的耗能能力要好于 SMA 丝.

3 结 论

(1) 对于同一形式的 SMA 线材: 应变幅值对应力诱发马氏体相变应力的影响可以忽略; 随着应变幅值的增大, SMA 的残余变形也逐渐增大; 而最大相变应变, 即屈服平台的长度会随着应变幅值增大到一定程度后趋于稳定; 应变幅值是影响耗能能力的主要因素, SMA 的单位体积耗能和等效阻尼比都会随着应变幅值的增大而减小. 循环次数对 SMA 的应力诱发马氏体相变应力影响较大, 应力诱发马氏体相变应力会随着循环次数的增加而减小并趋于稳定; 随循环次数的增加, SMA 丝的残余变形不断增大并趋于稳定, 而 SMA 绞线的残余变形则是先减小后增大再减小; 最大相变应变随着循环次数的增大而减小并趋于稳定; 循环次数增加使得 SMA 的单位体积耗能

逐渐减小并趋于稳定, 但对等效阻尼比的影响较小.

(2) 对于两种形式的 SMA 线材: 相同加卸载条件下, SMA 绞线比 SMA 丝的应力诱发马氏体相变应力大, 应力诱发马氏体相变相当于钢筋的屈服强度, 这说明混凝土构件中埋设 SMA 绞线要比 SMA 丝具有较高的承载能力; 而且, SMA 绞线的残余变形也比 SMA 丝的残余变形小, 当混凝土构件卸载后, SMA 绞线能够更好地控制构件的裂缝. 此外, SMA 绞线比 SMA 丝的耗能能力也略好一些.

(3) 由上述结论可知, SMA 线材的形式对其超弹性力学性能有一定的影响. 因此, 将 SMA 线材的形式作为超弹性 SMA 力学性能研究的一个影响因素是有必要的, 这对于发展结构-控制一体化的 SMA 智能混凝土构件或结构有着重要的意义.

(4) 由于 SMA 绞线在大应变幅值条件下卸载时会出现散捆现象, 大变形的条件下不宜使用 SMA 绞线.

参考文献:

- [1] 李宏男, 阎石. 中国结构控制的研究与应用 [J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(1): 107-112
- [2] 任勇生. 智能材料在土木结构监测和振动控制中的应用 [J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(5): 486-493
- [3] 李宏男. 结构健康监测 [M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2004
- [4] STRNADEL B, OHASHI S, OHTSUKA H, *et al.* Effect of cycling on the pseudoelasticity characteristics of Ti-Ni and Ti-Ni-Cu alloy [J]. *Mater Sci and Eng*, 1995, A203: 187-196
- [5] PIEDBOEUF M C, GAUVIN R. Damping behaviour of shape memory alloys strain, amplitude, frequency and temperature effects [J]. *J Sound and Vib*, 1998, 214(5): 885-901
- [6] DOLCE M, CARDONE D, MARNETTO R. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys [J]. *Earthquake Eng and Struct Dyn*, 2000, 29: 945-968
- [7] DOLCE M, CARDONE D. Mechanical behaviour of shape memory alloys for seismic applications 2.

- Austenite NiTi wires subjected to tension [J]. *Int J Mech Sci*, 2001, **43**: 2657-2677
- [8] 巩建鸣, 户伏寿昭. 承受各种循环加载的 TiNi 形状记忆合金的超弹性变形行为 [J]. *功能材料*, 2002, **33**(4): 391-393, 397
- [9] 倪立峰, 李爱群, 左晓宝. 工程结构的 SMA 超弹性阻尼研究 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2003, **33**(2): 168-171
- [10] 左晓宝, 李爱群, 倪立峰, 等. 超弹性形状记忆合金丝 (NiTi) 力学性能的试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2004, **37**(12): 10-16
- [11] LAGOUDAS D C, ENTCHEV P B, KUMAR P K. Thermomechanical characterization of SMA actuators under cyclic loading [C]// *Proceedings of IMECE'03. 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress*. Washington D C: ASME, 2003: 1-7
- [12] MCCORMICK J, DESROCHES R. Damping properties of shape memory alloys for seismic applications [C]// *Proceeding of ASCE Structures Congress*. Nashville: ASCE, 2004: 1-11
- [13] MIYAZAKI S, IMAI T, IGO Y, *et al.* Effect of cyclic deformation on the pseudoelasticity characteristics of Ti-Ni alloys [J]. *Metal Trans A*, 1986, **17A**(1): 115-120

Experimental investigation on mechanical properties of new form superelastic shape memory alloy wires

CUI Di¹, LI Hong-nan^{*1}, SONG Gang-bing^{1,2}

(1.State Key Lab. of Coastal and Offshore Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;

2.Dept. of Mech. Eng., Univ. of Houston, Houston, 77204, USA)

Abstract Superelasticity is one of the most important properties of shape memory alloy (SMA). Considering the advantages of steel strands in mechanical properties, a new form of SMA wires—SMA strands, is proposed, which can be applied to concrete members. The superelastic mechanical properties, such as stress-induced martensite phase transformation stress, residual strain, maximum phase transition strain and damping properties, of the SMAs in both the ordinary SMA wires and the strands are compared with respect to strain amplitude and cyclic number. By analyzing the test results, a conclusion can be drawn that the mechanical properties of the SMA strands are better than those of the SMA wires. The form of SMA is suggested as an influencing factor of the superelastic mechanical properties.

Key words shape memory alloy; superelasticity; cyclic loading test; mechanical property