文章编号:1674-2974(2025)03-0213-15 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025041

7×7构型NiTi形状记忆合金绞线超弹性试验研究

周玉浩[1],连鸣[1,2†],苏明周[1,2],王颜凯[1]
(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055;
2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室,陕西 西安 710055)

摘 要:重点探讨了单丝直径为1.0 mm的7×7构型超弹性形状记忆合金(SMA)绞线的力学性能,主要关注其回复能力和耗能能力.分析了热处理方案、应变幅值、循环加载、预训练和加载速率对SMA绞线的残余应变、能量耗散、等效黏滞阻尼比、强度和刚度的影响.此外,通过单调拉伸试验比较了SMA绞线与SMA丝材的抗拉强度和极限应变.结果表明,经过400 ℃下退火10 min后,SMA绞线具有出色的超弹性性能,应变回复率达到91.7%.在恒定应变幅值加卸载训练下,SMA绞线的力学性能逐渐趋于稳定,应在工程应用中予以考虑;通过预训练的方式可以显著提高SMA绞线的回复能力,未经热处理和退火10 min的试件在预训练后残余应变分别降低了47%和41%;当加载速率大于$5\times10^{-4}\ s^{-1}$后,SMA绞线的滞回环形态对加载速率的变化不敏感;与SMA丝材相比,SMA绞线具有更好的延性和鲁棒性,适用于在大变形情况下提供足够的恢复力;试验结果为SMA绞线的工程应用提供了试验数据支持.

关键词:形状记忆合金绞线;超弹性;热处理方案;预训练;力学性能
中图分类号:TG139.6 **文献标志码**:A

Experimental Investigation on Superelasticity of 7×7 NiTi Shape Memory Alloy Cables

ZHOU Yuhao[1], LIAN Ming[1,2†], SU Mingzhou[1,2], WANG Yankai[1]
[1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (XAUAT), Xi'an 710055, China]

Abstract: This paper focuses on examining the mechanical properties of 7×7 configuration superelastic shape memory alloy (SMA) cables with a single wire diameter of 1.0 mm. The primary emphasis is on assessing their recovery capability and energy dissipation capacity. A detailed investigation on the effects of the heat treatment strategy, strain amplitude, cyclic loading, pre-training, and loading rate of the SMA cables on their mechanical performance—residual strain, energy dissipation, equivalent viscous damping ratios, strength, and stiffness—was conducted. Furthermore, the tensile strength and ultimate strain of SMA cables and SMA wire were compared by

* **收稿日期**:2024-03-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078411), National Natural Science Foundation of China(52078411);陕西省创新能力支撑计划-青年科技新星资助项目 (2022KJXX-47), Shaanxi Province Innovation Ability Support Program-Youth Science and Technology New Star Project (2022KJXX-47);陕西省教育厅青年创新团队科研计划项目(22JP041), Shaanxi Provincial Department of Education Youth Innovation Team Research Project (22JP041)
作者简介:周玉浩(1996—),男,河南洛阳人,西安建筑科技大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: lianming@xauat.edu.cn

monotonic tensile tests. The results show that the SMA cable has excellent superelasticity after annealing at 400 °C for 10 min, and the strain recovery rate reaches 91.7%. Under constant strain amplitude loading and unloading training, the mechanical properties of SMA cable gradually tend to be stable, which should be considered in engineering applications. The recovery ability of SMA cable can be significantly improved by pre-training. The residual deformation of specimens without heat treatment and annealed for 10 min is reduced by 47% and 41% after pre-training, respectively. When the loading rate is greater than 5×10^{-4} s^{-1}, the hysteresis loop shape of SMA cable is not sensitive to the change of loading rate. Compared with SMA wire, SMA cable has better ductility and robustness, which is suitable for providing sufficient restoring force in the case of large deformation. The test results provide experimental data support for the engineering application of SMA cables.

Key words: shape memory alloy (SMA) cable; superelasticity; heat treatment strategy; pre-training; mechanical property

NiTi形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)是一种智能材料,具备独特的形状记忆效应和超弹性.通常情况下,SMA具有两种晶体状态:奥氏体状态和马氏体状态.由于这两种固相状态之间的可逆相变,SMA在经历大变形后可以恢复到其原始形状[1].超弹性SMA以其独特的高阻尼、良好的能量耗散、高疲劳性和自复位等特点,广泛应用于土木工程的被动减震控制领域[2-3].

目前,土木工程领域应用的SMA主要以丝材[4-6]、棒材[7-9]、螺旋弹簧[10]、碟形弹簧[11]、板材[12]和绞线[13-18]等形式工作.SMA绞线作为一种相对较新的构造形式,是由丝材元件以分层方式组成的组合结构,通过一定数量的丝材根据不同结构形式螺旋缠绕绞合而成.这种由多根小直径SMA丝材组成的SMA绞线,成本较低且承载力较大.此外,SMA绞线在设计中具有很好的灵活性,可以通过选择绞线的截面几何形状、截面尺寸、缠绕方式和丝材直径,以满足实际应用中的需求.

考虑到SMA绞线的上述优点,学者们进行了一系列关于其开发和应用的研究.Reedlunn等[19]和Biggs等[20]对7×7构型的超弹性SMA绞线进行了试验研究,发现这种构型表现出类似SMA丝材的单轴拉伸响应,并能够有效地"放大"SMA丝材的优越性能.Ozbulut等[13]和Sherif等[14]重点研究了SMA绞线的疲劳特性及其在不同加载速率和应变幅值下的超弹性响应.Fang等[15]研究了不同热处理方案对单丝直径0.8 mm的7×7构型SMA绞线的影响,包括强度、刚度、耗能能力和自复位能力等方面的变化规律.Shi等[16-17]针对单丝直径0.885 mm的7×7构型SMA绞线提出了两种端部锚固方式,并通过试验研究了环境温度对其滞回性能和超弹性疲劳行为的影响.试验结果表明,环境温度显著影响了SMA绞线的超弹性行为.当SMA绞线在接近其奥氏体相变结束温度的条件下加载时,功能退化最小;然而,当环境温度接近其逆相变温度时,随着加载幅值和循环次数的增加,超弹性行为的退化变得更严重.此外,Shi等[18]研究了直径4.2 mm的7×7构型SMA绞线,该绞线由3种不同直径的SMA丝材组成,重点研究了不同热处理温度和预应变对绞线的力学特征参数的影响.

当前研究表明,7×7构型SMA绞线具有与SMA丝材相似的超弹性特性和出色的滞回性能,同时具备充足的承载能力、更好的延性和鲁棒性,而且其取材于SMA丝的成本相对较低,因此在结构振动控制领域应用中,它被视为理想的抗拉元件.然而,目前学者们在研究SMA绞线的热处理方案时,通常考虑热处理温度和时间的协同作用.导致提出的热处理温度和时间的合理取值范围较大,不便于在实际应用中进行选择.此外,关于不同加载速率、预训练以及单调拉伸等因素对SMA绞线在超弹性特性、疲劳性能和极限状态方面的影响仍需要进一步深入研究.因此,开展SMA绞线的力学性能试验,研究提升其超弹性行为的方案,并探究在不同热处理条件下的极限断裂能力,对于SMA绞线的设计和应用具有重要的工程实际意义.

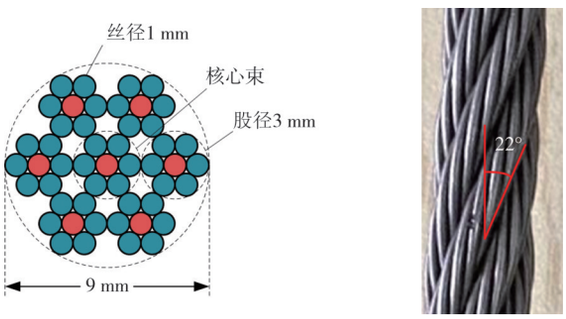
本研究以单丝直径1.0 mm的7×7构型超弹性SMA绞线为对象,采用室温循环拉伸试验,系统研究了在不同热处理方案、应变幅值、循环次数、预训练

和加载速率下,该绞线的屈服强度、残余应变、割线刚度、单圈循环耗能和等效黏滞阻尼比等力学特征参数的变化规律.此外,进行了7×7构型SMA绞线的单调拉伸试验,并与SMA丝材进行对比,以研究不同热处理方案下绞线的极限变形能力,为7×7构型SMA绞线的工程应用提供试验数据支持.

1　试验方案

1.1　试件设计

如图1所示,本研究使用的SMA绞线由49根直径为1.0 mm的SMA丝材构成,采用7×7的构造形式.该构型由7根SMA束组成双层结构,其中内层为1根核心直束,外层由6根边束以右手螺旋形式缠绕核心束,捻角为22°.每根SMA束由7根SMA丝组成,理论外径均为3.0 mm,但核心束采用右手螺旋缠绕方式,而6根边束采用左手螺旋缠绕方式.SMA绞线的理论外径为9.0 mm,名义横截面面积为38.465 mm^2.



(a)7×7绞线横截面　　(b)纵向外观

图1　7×7构型SMA绞线横截面及纵向外观示意图

Fig.1　Schematic diagram of the cross section and longitudinal appearance of the 7×7 SMA cable

SMA丝材由商用Ti-56.06%Ni合金制成,即镍原子含量占比为56.06%,其余成分均为钛原子.根据厂家提供的相变温度测试报告,该批SMA丝材的相变温度分别为M_f(-56.3 ℃)、M_s(-27.9 ℃)、A_s(-6.7 ℃)和A_f(18.4 ℃).这意味着在室温下,该丝材处于奥氏体状态.图2展示了SMA丝材的循环拉伸试验曲线,表现出典型的旗帜形滞回特性,并具有出色的自复位性能.随着拉伸循环次数的增加,丝材的累积残余应变逐渐增大.在经历8%应变幅值的循环拉伸后,累积残余应变约为0.7%,变形恢复率超过90%,这验证了所测SMA丝材在室温下具有出色的超弹性性能.

本研究共测试了17根SMA绞线试件,所有试件均来自同一根SMA绞线,采用局部熔切的方式制备

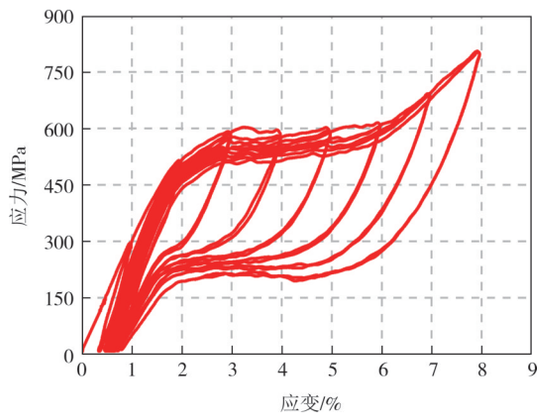


图2　超弹性SMA丝材应力-应变曲线

Fig.2　Stress-strain curve of superelastic SMA wire

而成.为确保试验过程中试件端部不会出现应力集中和夹持端不会发生滑移,参考当前的SMA绞线端部锚固方式[15-16],将绞线试件的热熔端插入预制端头的孔道,并进行机械挤压,以防止绞线发生松散.最后,将端头预留长度部分加工成螺纹状,以便后续的连接和预拉伸.试件的基本构造如图3所示,每个试件的总长度为520 mm,其中锚固端头长度为140 mm,包括加持段长度80 mm和锚固段长度60 mm. SMA绞线的总长度为330 mm,其中有效长度为240 mm,两端的锚固长度均为45 mm.

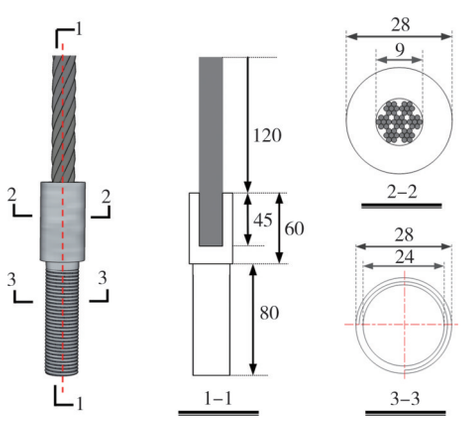


图3　SMA线缆基本构造(单位:mm)

Fig.3　Basic construction of SMA cable (unit:mm)

在研究影响SMA材料力学性能的热处理方案时,主要考虑了热处理温度和退火时长的不同[14,17].已往的研究主要集中在热处理温度的改变,并指出在400~500 ℃范围内,室温条件下的SMA绞线展现出良好的超弹性性能,而过高的热处理温度会削弱SMA绞线的成形能力和力学性能[15].因此,本研究选择将热处理温度固定在400 ℃,并通过调整不同的退火时间来研究其对超弹性SMA绞线的力学性能产生的影响.在试验过程中,将已加工好的试件置于

400 ℃的炉温下进行退火处理,分别设定退火时间为10 min、20 min和30 min,然后自然冷却.经过退火处理后的绞线试件如图4所示,可以观察到随着退火时间的延长,试件的颜色逐渐加深.



图4 退火前后的SMA绞线试件对比

Fig.4 Comparison of SMA cable specimens before and after annealing

1.2 试验装置及加载制度

SMA绞线试件的循环拉伸试验使用250 kN MTS 322.31电液伺服疲劳试验机进行加载,加载装置如图5所示.试验过程中的荷载和位移由MTS试验机内置的传感器记录,通过用记录荷载除以绞线的名义横截面面积来计算绞线的应力,全局应变则由记录的位移除以试件有效长度来确定[15-16].试验采用等速率的加/卸载模式,以SMA绞线应变达到预设应变幅值作为终止条件,所有测试均在室温[(25±1)]℃下进行.

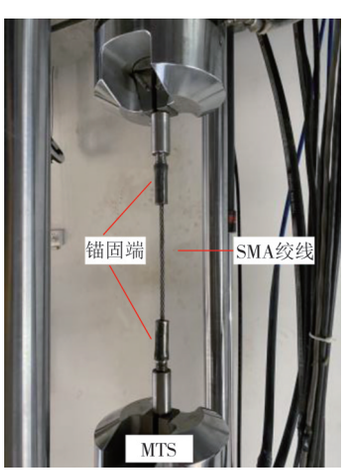


图5 SMA绞线试验加载装置

Fig.5 Loading setup for testing of SMA cable

如图6所示,本试验采用了两种典型的加载制度,即递增幅值循环加载和恒定幅值循环加载.探究SMA绞线在以下5种不同工况下的力学性能.

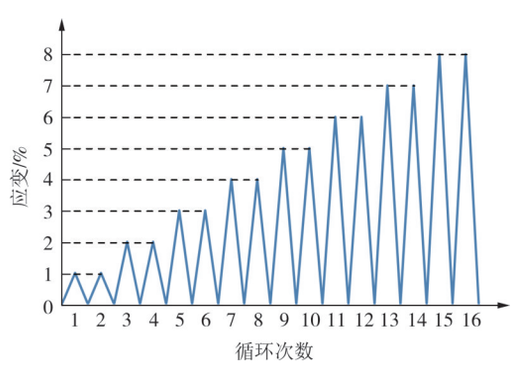
1)递增幅值加载:考察应变幅值对SMA绞线超弹性性能的影响.加载速率为5×10^{-4} s^{-1},应变幅值以1%的应变步长递增,由1%逐级增加至8%,每级循环两次.

2)恒定幅值加载:了解循环荷载作用下SMA绞线的超弹性演化规律.加载速率为5×10^{-4} s^{-1},施加恒定的6%应变幅值,并重复进行20次循环.

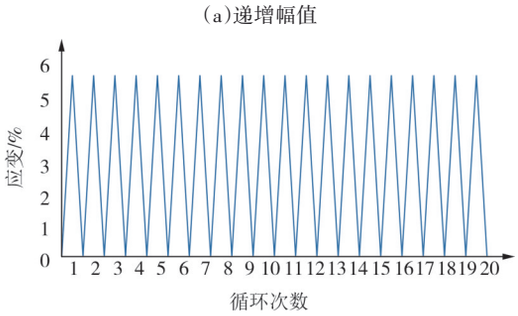
3)预训练后递增幅值加载:旨在考察预训练后SMA绞线的超弹性变化情况.加载速率为5×10^{-4} s^{-1},首先对SMA绞线在6%应变幅值下进行20圈循环,然后进行递增幅值加载.

4)变速率加载:了解不同加载速率对SMA绞线滞回性能的影响.应变幅值为8%,而加载速率分别为5×10^{-5} s^{-1}、5×10^{-4} s^{-1}、1×10^{-3} s^{-1}、3×10^{-3} s^{-1}、5×10^{-3} s^{-1}.

5)单调拉伸:了解不同热处理条件下SMA绞线的极限应力-应变关系,并与SMA丝材进行对比,加载速率为1×10^{-3} s^{-1}.



(a)递增幅值



(b)恒定幅值

图6 加载制度

Fig.6 Loading protocols

表1列出了被测试件的详细信息.为了便于标识和分类,每根SMA绞线都被指定了一个试验代码.其中,第一个符号表示退火时间(NA表示未退火),第二个符号表示加载方案(IA为递增幅值加载,CA为恒定幅值加载,PT为预训练加载,UL为单圈循环加载,MT为单调拉伸加载),第三个符号表示加载速率.例如,试件10-CA6-0.0005表示7×7构型SMA绞线在400 ℃条件下退火时间为10 min,加载方案采用了6%应变幅值的常幅加载,加载速率为5×10^{-4} s^{-1}.

表 1　SMA 绞线循环拉伸试验分组

Tab.1　SMA cables cyclic tensile test grouping

试件编号	热处理温度/℃	退火时间/min	加载速率/s^{-1}	最大应变/%	加载制度
NA-IA-0.0005	—	—	5×10^{-4}	8	变幅加载
10-IA-0.0005	400	10	5×10^{-4}	8	变幅加载
20-IA-0.0005	400	20	5×10^{-4}	8	变幅加载
30-IA-0.0005	400	30	5×10^{-4}	8	变幅加载
NA-CA6-0.0005	—	—	5×10^{-4}	6	常幅加载
10-CA6-0.0005	400	10	5×10^{-4}	6	常幅加载
NA-PT-0.0005	—	—	5×10^{-4}	8	预训练加载
10-PT-0.0005	400	10	5×10^{-4}	8	预训练加载
10-UL-0.00005	400	10	5×10^{-5}	8	单循环加载
10-UL-0.0005	400	10	5×10^{-4}	8	单循环加载
10-UL-0.001	400	10	1×10^{-3}	8	单循环加载
10-UL-0.003	400	10	3×10^{-3}	8	单循环加载
10-UL-0.005	400	10	5×10^{-3}	8	单循环加载
NA-MT-0.001	—	—	1×10^{-3}	—	单调加载
10-MT-0.001	400	10	1×10^{-3}	—	单调加载
20-MT-0.001	400	20	1×10^{-3}	—	单调加载
30-MT-0.001	400	30	1×10^{-3}	—	单调加载

1.3　力学特征参数

超弹性SMA的应力-应变曲线和力学指标如图7所示,其中,σ_{Ms}和σ_{Mf}分别代表应力诱发马氏体正相变的开始应力和结束应力,而σ_{As}和σ_{Af}则分别表示应力诱发马氏体逆相变的开始应力和结束应力.ε_{max}和ε_{res}分别表示一次循环加载的应变幅值和残余应变.

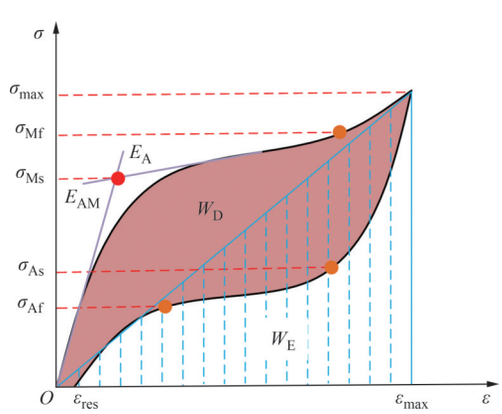


图7　超弹性SMA应力-应变关系示意图

Fig.7　Stress-strain diagram of superelastic SMA

为了定量分析SMA绞线在不同工况下的力学性能变化,定义了以下力学特征参数.

1)屈服强度σ_{Ms}:SMA绞线的屈服强度用马氏体相变的临界应力σ_{Ms}表示[15].

2)割线刚度K_s:反映材料的刚度退化效应[16],计算公式为

$$K_s=\frac{F_{max}}{\delta_{max}} \tag{1}$$

式中:F_{max}和δ_{max}分别代表任一圈循环中荷载-位移曲线的最大拉力和最大拉伸位移.

3)残余应变ε_{res}:SMA绞线在任一圈循环结束时的残余应变,其值反映了材料的变形恢复能力.

$$\varepsilon_{res}=\frac{\delta_{res}}{L_e} \tag{2}$$

式中:δ_{res}为一次载循环结束时零荷载对应的变形位移值;L_e为SMA绞线的有效计算长度,取值为L_e=240 mm.

4)单圈循环耗能W_D:SMA绞线任一圈循环滞回曲线所包络的面积,即SMA循环一周所耗散的能量.

5)等效黏滞阻尼比ξ_{eqv}:反映SMA材料的阻尼性能.

$$\xi_{eqv}=\frac{W_D}{4\pi W_E}=\frac{W_D}{2\pi K_s\delta_{max}^2} \tag{3}$$

式中:W_E表示具有相同δ_{max}和F_{max}的线性系统所吸收的能量.

2　试验结果与分析

所有循环拉伸试件在整个加载过程中均顺利完成了目标应变幅值的加载,并且未发生脱丝和异常断裂等现象.随着循环加载次数的增加,当试件卸载

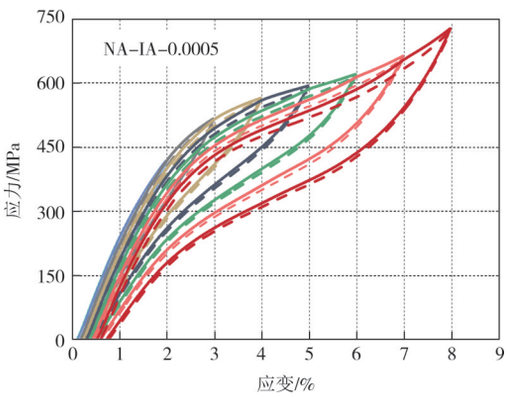
至位移为零时,观察到了侧向的“弯曲”现象.这一现象可以归因于累积的残余应变导致了绞线的永久伸长.

2.1 热处理方案及应变幅值对SMA绞线超弹性的影响

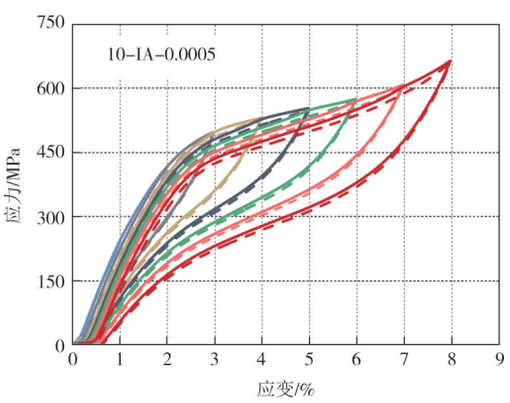
如图8所示,不同热处理方案下的SMA绞线在增幅加载下均表现出良好超弹性性能.然而,与SMA丝材的旗帜形滞回曲线不同,试验中的4个试件的滞回曲线在各个相变阶段和相变点上表现不太明显.这是由于7×7构型SMA绞线包含多个单丝,受力作用下单丝之间的应力发展不同步,轴向荷载在不同丝材之间分布不均匀.因此,丝材的相变开始点存在先后顺序,这种应力发展的不同步性导致SMA绞线的总应力-应变曲线呈现非同步性.此外,热处理方案对SMA绞线的滞回性能产生显著影响.随着退火时间的增加,试件的峰值应力逐渐降低,残余应变逐渐增加.每个试件的马氏体正相变和逆相变的“屈服平台”高度也持续下降,即正、逆相变的特征应力逐渐减小.然而,逆相变平台的降低幅度更大,导致滞回环面积逐渐增大.在加载应变幅值大于6%后,所有试件均呈现出马氏体硬化现象.此外,可以观察到SMA绞线在应变6%~8%范围内仍表现出良好的自复位能力,但在循环荷载下的退化较明显,因此建议抗震应用时将最大应变控制在6%.

图9为不同热处理方案下SMA绞线的力学性能参数随应变幅值的变化趋势.在图9(a)中,可以看出SMA绞线的屈服强度σ_{Ms}随着拉伸应变幅值的增加而持续降低.对于相同的应变幅值,随着退火时长的增加,σ_{Ms}也会下降,但退火10 min试件与NA试件之间的σ_{Ms}差异不大,而退火20 min和30 min试件的σ_{Ms}几乎相同.根据文献[21]的研究结果,这可能与热处理后试件的析出相颗粒的尺寸和Ti_3Ni_4析出程度有关,因为Ti_3Ni_4的析出相形成的内部应力场可以降低相变应力.

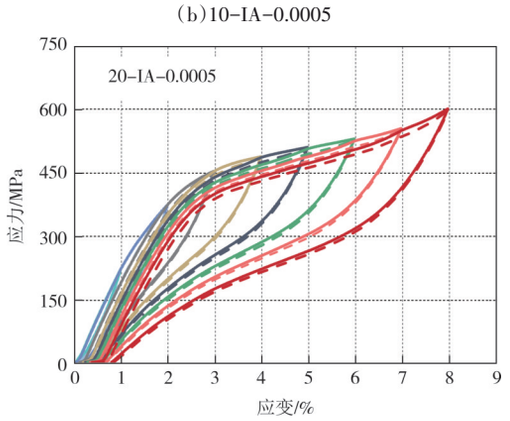
如图9(b)所示,试件的割线刚度K_s在4%应变之前随着应变幅值的增加急剧下降,但随后K_s的降低速度逐渐减小并趋于稳定.此外,在相同的应变幅值下,试件的K_s随着退火时间的增加而降低,但在超过10 min的退火时长后,试件的K_s基本保持不变.在8%应变幅值下,与退火10、20、30 min试件相比,NA试件的K_s分别高出9.6%、21.0%和24.8%.这也反映了由于热处理的作用,SMA绞线的最大应力发生退



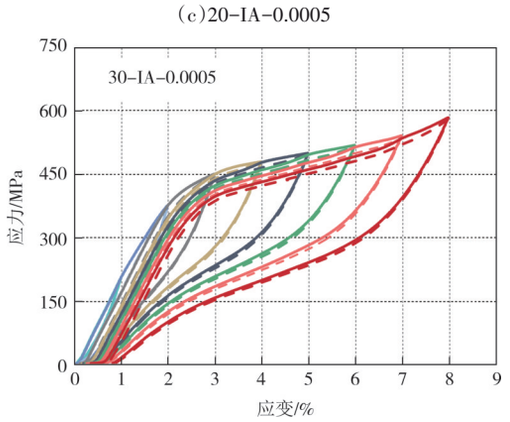
(a)NA-IA-0.0005



(b)10-IA-0.0005



(c)20-IA-0.0005



(d)30-IA-0.0005

图8 增幅加载下不同热处理方案的SMA绞线滞回曲线

Fig.8 Hysteresis curves of SMA cables with different heat treatment schemes under increased loading

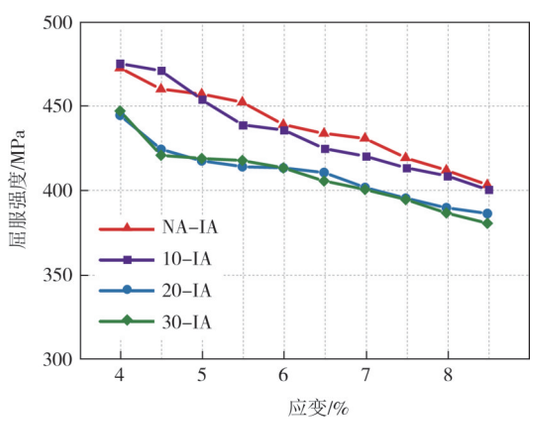
化,但当退火时间超过 10 min后,退化程度明显减小,与滞回曲线中的变化趋势一致. 因此,退火时间过长会导致SMA绞线的屈服强度和峰值应力显著退化,这与已有研究在过高的热处理温度下表现出的变化规律相同[15],但相比于温度的变化,退火时长的变化对SMA绞线峰值应力的影响更为显著.

图9(c)显示了试件在不同应变幅值下的残余应变与应变幅值的关系. 可以观察到,各试件的残余应变随着应变幅值的增加呈线性增加的趋势. 当应变幅值小于3%时,试件表现出小于0.4%的轻微残余应变,且在相同加载级下试件的残余应变几乎相等. 然而,当应变幅值大于3%后,残余应变显著增加,尤其是退火 20 min和 30 min试件的残余应变明显增大,而退火 10 min试件残余应变增幅相对较小. 这种残余应变通常由材料本身的相变诱发疲劳[15]和加载过程中的结构松弛引起. 其中,结构松弛现象在绞线结构中普遍存在,通过预训练的方式可以减小这两种因素的影响. 图9(d)展示了8%应变幅值加载结束后试件的累积残余应变情况. 随着退火时间的延长,累积残余应变逐渐增加. 退火 10 min试件的累积残余应变最小,仅为0.661%,相应的应变恢复率为91.7%. 这表明适当的退火时长可以显著减小SMA绞线的残余应变,降低功能疲劳损伤,同时提高绞线的恢复能力.

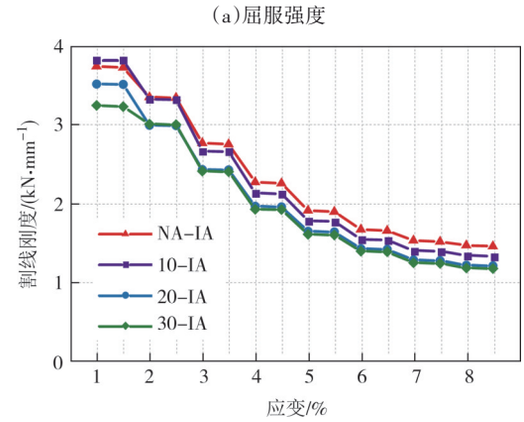
如图9(e)所示,随着应变幅值和退火时间的增加,每个循环中的能量耗散呈上升趋势. 在前两个循环中(1%应变幅值),每个循环的能量耗散非常有限,这是由奥氏体弹性响应所导致的. 随着应变幅值的增加,W_D呈线性增加趋势. 因此增大应变幅值可以提高SMA绞线的耗能能力. 先前的研究指出SMA绞线的疲劳寿命受到应变幅值的显著影响,随着应变幅值的减小,疲劳寿命逐渐增大[22]. 为了提高SMA绞线的疲劳寿命并避免基于SMA的自复位装置或构件过早失效,在实际工程应用中应对其应变幅值大小进行限制. 此外,在相同的应变幅值下,退火 10、20、30 min试件的W_D均高于NA试件,这表明SMA绞线的W_D随着退火时间的增加而增大. 在相同的加载级下,SMA绞线在第二次循环加载中的W_D低于第一次循环加载,且应变幅值越大,降低的幅度越大.

图9(f)显示SMA绞线的ξ_{eqv}值位于1.0%~5.0%之间,而常见的SMA丝材ξ_{eqv}值大多处于7%左右[18]. 这主要是由绞线自身的结构特性导致其中的SMA丝材应力发展不同步,从而降低了SMA绞线的整体耗能能力. 在相同的应变幅值下,经过退火处理的试件相比未退火试件具有更高的ξ_{eqv},并且随着退火时间的增加,增幅更为显著. 这是因为随着退火时间的增加,SMA绞线的奥氏体结束温度升高,从而在相同环境温度下削弱其超弹性性能和峰值应力. 因此,热处理有利于提高SMA绞线的耗能能力. 这一现象被认为是由于退火处理提高了SMA绞线的定型能力,从而使其中的SMA丝材的应力发展趋向同步[15].

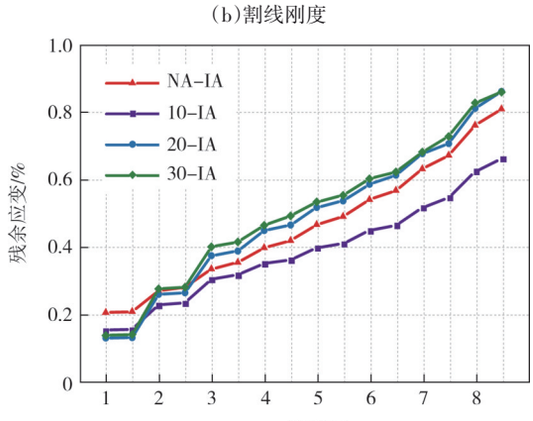
综上所述,合适的热处理工艺可以优化SMA绞



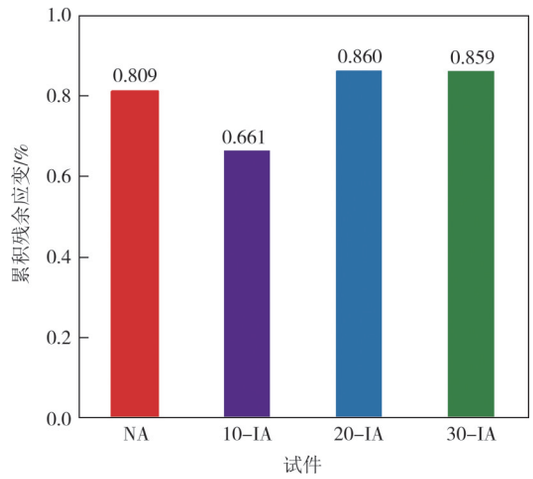
(a)屈服强度



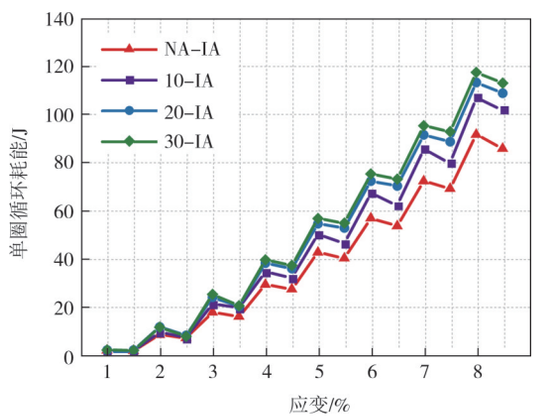
(b)割线刚度



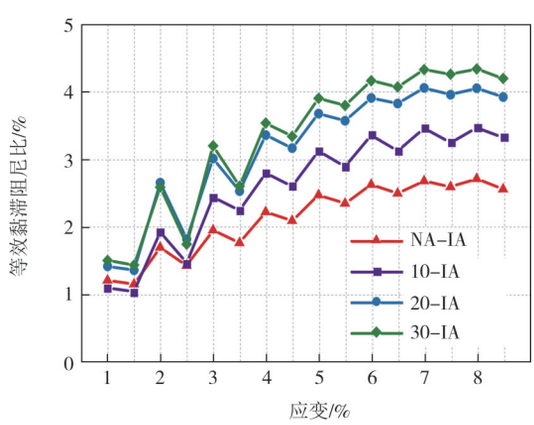
(c)残余应变



(d)累积残余应变



(e)单圈循环耗能



(f)等效黏滞阻尼比

图9 不同力学性能参数随应变幅值变化趋势

Fig.9 Variation of mechanical property parameters with strain amplitudes

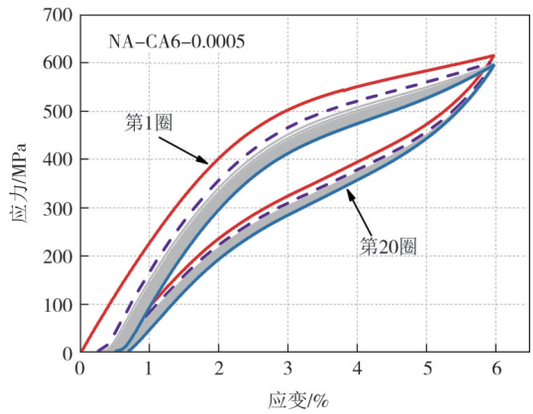
线的力学性能,使其满足某些工程的性能需求.对于所测的7×7构型SMA绞线,在热处理温度为400 ℃时,退火10 min可以获得良好的强度和刚度,同时也提高了耗能能力和回复能力.

2.2 循环加卸载次数对NiTi形状记忆合金绞线超弹性的影响

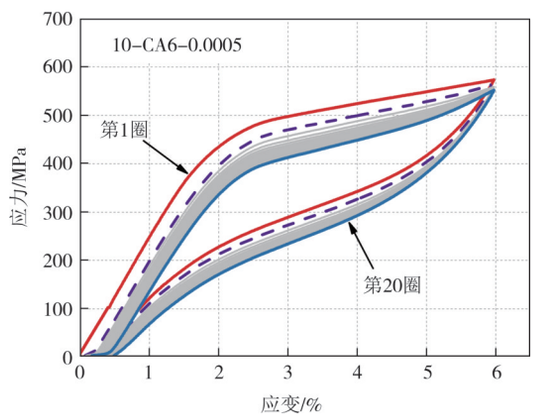
残余应变被认为是功能性疲劳损伤现象[23],因为它导致了SMA材料的超弹性回复能力的降低.在实际工程中,SMA构件通常需要经历重复的机械循环,因此准确了解这种功能退化对于基于SMA的部件设计和维护是必不可少的.为了充分利用SMA材料的力学性能,应尽量选择较大的应变幅值进行恒定幅值循环拉伸训练,以获得训练后更大、更稳定的工作应变范围.由上述增幅加载试验发现,当应变幅值超过6%后开始出现马氏体硬化现象,即应变幅值超过该值后,SMA绞线的残余应变累积速率明显大于幅值小于6%的情况,这可能会导致预训练后工作应变范围较小.因此,本文选取6%应变幅值进行恒定幅值循环拉伸试验,以研究循环训练次数对SMA绞线力学性能的影响.

图10显示了NA试件和退火10 min试件在6%应变幅值下循环20圈的应力-应变曲线.由图可知,NA试件的应力-应变曲线呈现为光滑的圆弧曲线,滞回环呈梭形,而退火10 min试件的滞回曲线呈现出旗帜形,滞回环更加饱满.随着循环次数的增加,两个试件的滞回曲线向下移动,导致相变应力平台下移,但正向相变应力下降得更快,所以滞回环的面积逐渐减小.在加卸载5次之后,滞回曲线的形状基本稳定.不同循环次数下滞回曲线各阶段基本保持平行,表明循环次数对各阶段的变形模量影响较小.滞回曲线的起点随着循环次数的增加逐渐向右偏移,这是由循环过程中残余应变的累积导致的.然而,在循环加载后期,残余应变累积趋于饱和,这种现象逐渐减弱.因此,在实际工程应用中,可以提前对SMA绞线进行拉伸训练,以使其性能稳定.

图11展示了两试件的力学特征参数随循环次数的变化曲线.总体而言,屈服强度σ_{Ms}、割线刚度K_s、残余应变ε_{res}和等效黏滞阻尼比ξ_{eqv}随循环次数的增加逐渐趋于稳定.值得注意的是,尽管在循环次数增加的过程中,σ_{Ms}、K_s和ξ_{eqv}逐渐降低,但降低的幅度并不大.试件的各个力学性能参数在前3次循环加载中表现出显著的差异,每一次循环均伴随一定的数值变化,数值相较于前一次循环均有所下降.然而,随着循环加载次数的增加,每一次的降低幅度逐渐减小,最终接近极限值.这种行为被称为功能疲劳,可以在材料使用之前通过“预训练”来减轻疲劳效应[8].



(a)NA-CA6-0.0005



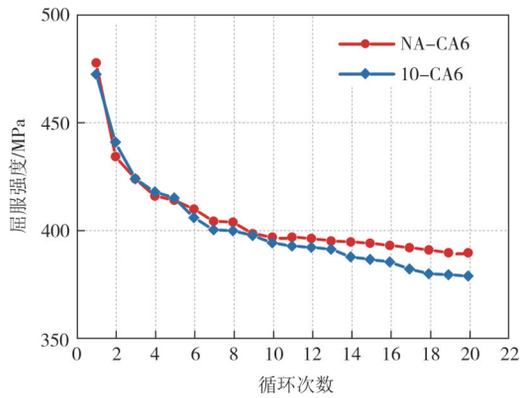
(b)10-CA6-0.0005

图 10　SMA 绞线 20 圈循环加载下的滞回曲线

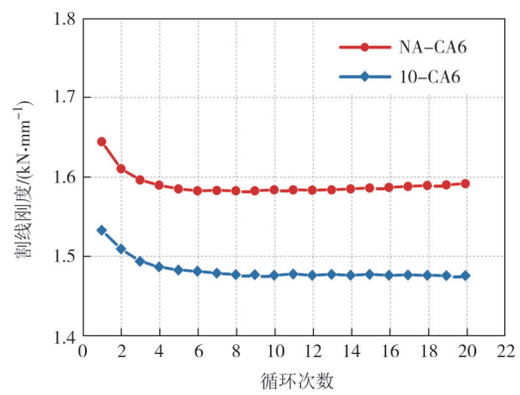
Fig.10　Hysteretic curves of SMA cable under 20 cycles cyclic loading

在图 11(c)中,显示了试件的残余应变 ε_{res} 随着循环次数的增加而逐渐增大,尤其是在第一次加载循环中累积最快. 这主要是因为初始状态下马氏体相变导致材料内部晶粒界面和位错累积较快,在宏观上表现出明显的塑性变形. 经过 20 次循环加载后,与首次循环相比,NA 试件和退火 10 min 试件的 ε_{res} 分别增加了 68% 和 108%,但残余应变最大值没有超过 0.8%,应变恢复率超过 85%. NA 试件的 ε_{res} 相较于退火 10 min 试件高出 44%,进一步说明了合理的热处理有利于降低 SMA 绞线的残余应变.

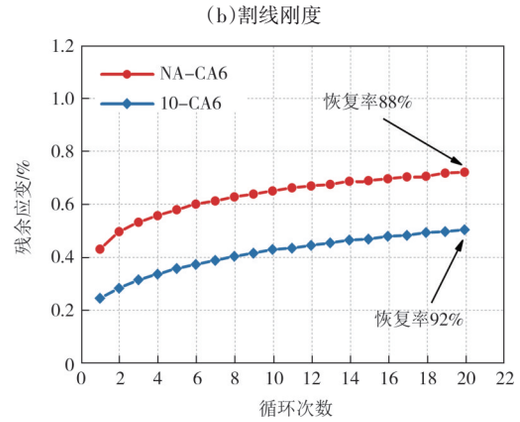
图 11(d)显示,循环加载结束后,NA 试件的 ξ_{eqv} 相较退火 10 min 试件降低了 33%,而两个试件的 ξ_{eqv} 相比首次循环分别降低了 37% 和 23%. 这进一步表明通过适当的热处理可以降低 SMA 绞线的力学性能退化程度. 另外,在相同应变幅值下,与已有研究在 300 ℃下退火 10 min 的 SMA 绞线相比,本研究中 400 ℃下退火 10 min 的试件 ξ_{eqv} 随循环次数的降低幅度更小[24]. 这得益于本研究采用的热处理温度降低了 SMA 绞线的内应力并增强了定型能力.



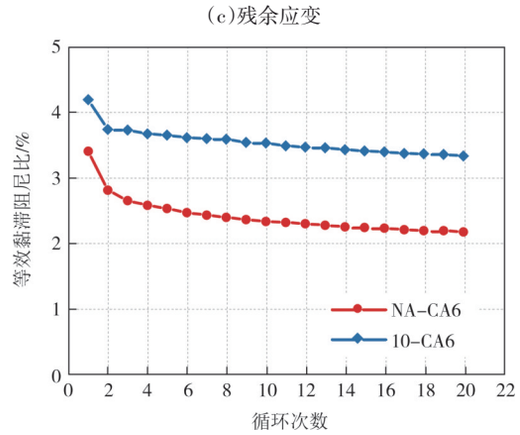
(a)屈服强度



(b)割线刚度



(c)残余应变



(d)等效黏滞阻尼比

图 11　不同力学性能参数随循环次数变化趋势

Fig.11　Variation trend of mechanical property parameters with cyclic numbers

此外,由式(4)~式(7)可知,当循环次数n足够大时,两试件的ε_{res}和ξ_{eqv}均趋于定值,该定值为循环拉伸稳定后的力学参数值.在6%恒定应变幅值下,NA试件和退火10 min试件的ε_{res}稳定值比20次循环结束后高出5.8%和14.1%,而ξ_{eqv}仅高出2.3%和7.2%.因此,经过20次加载循环后,SMA绞线的力学性能基本趋于稳定.

试件NA-CA6-0.0005:

$$\varepsilon_{res}=-0.167e^{-n/1.24}-0.297e^{-n/11.2}+0.761,\quad R^2=0.999\,4 \tag{4}$$

试件10-CA6-0.0005:

$$\varepsilon_{res}=-0.107e^{-n/2.65}-0.32e^{-n/19.5}+0.571,\quad R^2=0.999\,6 \tag{5}$$

试件NA-CA6-0.0005:

$$\xi_{eqv}=3.484e^{-n/0.58}+0.739e^{-n/8.51}+2.1,\ R^2=0.999\,6 \tag{6}$$

试件10-CA6-0.0005:

$$\xi_{eqv}=2\,103e^{-n/0.117}+0.8e^{-n/21.4}+3.013,\ R^2=0.998\,6 \tag{7}$$

式中:ε_{res}和ξ_{eqv}单位均为0.01;R^2为相关系数平方,反映了一个拟合函数的精确度,取值范围为0~1,其取值越接近1,表明方程的自变量对因变量的解释能力越强,函数模型的拟合效果越好.

2.3 预训练对NiTi形状记忆合金绞线超弹性的影响

为了消除材料内部的初始应力、初始缺陷和残余应变引起的功能损伤,以提高SMA材料的性能稳定性,在循环加载试验的基础上,对NA试件和热处理温度为400 ℃、退火时间为10 min的7×7构型SMA绞线在6%应变恒定幅值下进行了20次循环训练,随后进行增幅加载,对比有无预训练下SMA绞线的力学性能差异.图12展示了预训练后的SMA绞线在不同应变幅值下的滞回曲线.通过与图8(a)、8(b)的对比表明,试件经过预训练后,滞回曲线变窄并向下移动,相变平台和马氏体强化现象更为明显,正、逆相变应力的退化程度降低.

图13展示了SMA绞线在有无预训练条件下的力学特征参数随应变幅值的变化曲线.从图13(a)可以看出,预训练后试件的σ_{Ms}小于未训练试件,这是由循环训练后试件的功能疲劳引起的,然而,两者之间的差值在不同应变幅值下保持稳定,即6%应变幅值下,经过20次循环加载后,NA试件和退火10 min试件的σ_{Ms}相对于未训练试件的降低幅度稳定在15%和11%.如图13(b)所示,预训练后试件的K_s略小于未训练试件,这与预训练试件滞回曲线下移和每个加载级下峰值荷载的降低有关,但两者之间的差值随着应变幅值的增加逐渐降低.

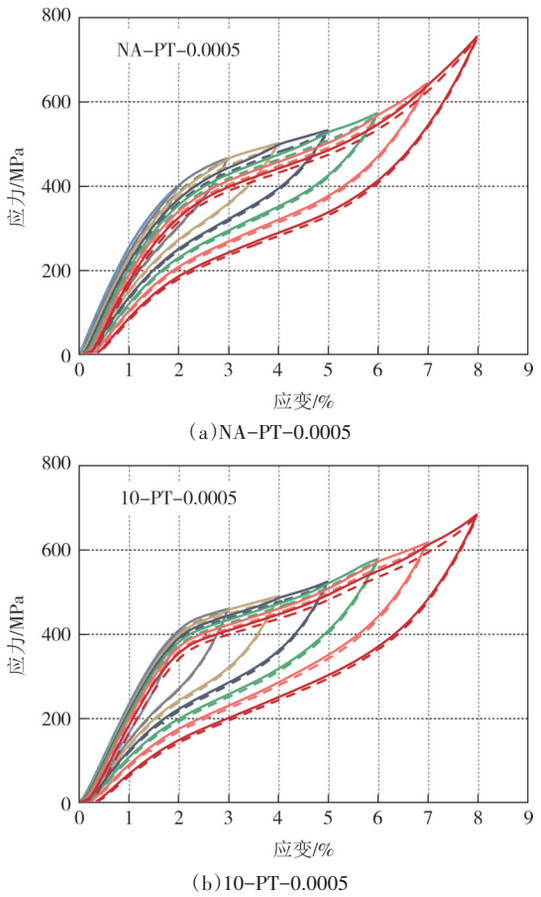
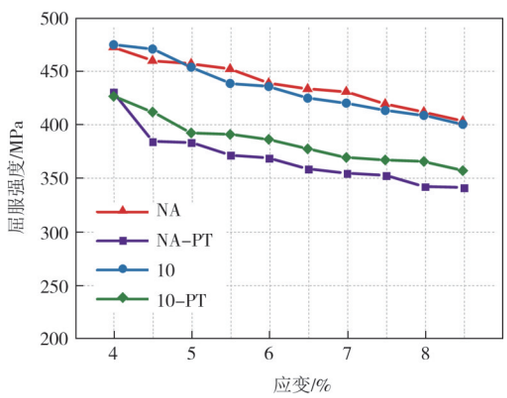


图12 预训练后SMA绞线在不同应变幅值下的滞回曲线

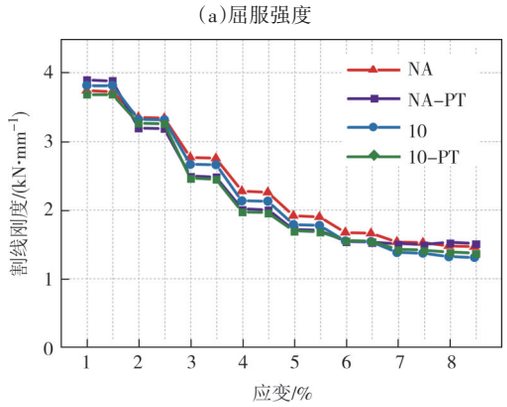
Fig.12 Hysteresis curves of SMA cable under different strain amplitudes after pre-training

由图13(c)~(e)可知,经过预训练后,试件的ε_{res}显著降低.具体而言,经过预训练的NA试件和退火10 min试件的累积残余应变分别为0.428%和0.391%,相较于未训练试件分别降低了47%和41%.因此,通过预训练的方式可以显著降低SMA绞线的残余应变.从单圈循环耗能W_D的变化曲线可以看出,在拉伸幅值小于6%的阶段,预训练试件和未训练试件的W_D几乎相同.因此,尽管预训练后的SMA绞线滞回曲线下移,但在拉伸幅值未超过其预训练幅值之前,其W_D没有发生退化.当应变幅值大于预训练幅值6%后,经过预训练后的退火10 min试件W_D有一定的提升,而NA试件的W_D则略有降低.这进一步说明了适当的热处理可以改善SMA绞线的耗能能力.图13(f)显示了等效黏滞阻尼比ξ_{eqv}存在三个

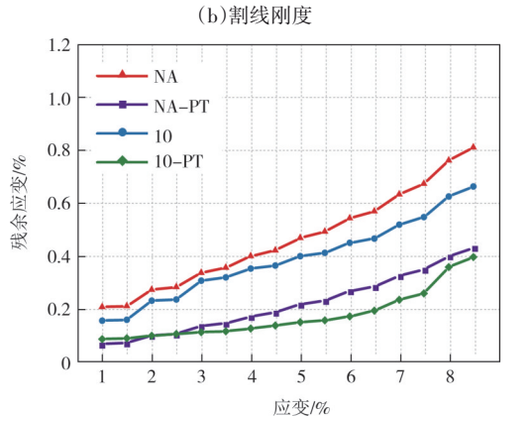
阶段的变化趋势.在拉伸幅值达到3%应变之前(1%~2%阶段),由于SMA绞线处于奥氏体弹性阶段,并且预训练试件与未训练试件的K_s几乎相等,因此它们的ξ_{eqv}基本重合.在拉伸幅值小于预训练应变幅值6%时(3%~6%阶段),SMA绞线处于马氏体正相变阶段,预训练后的滞回曲线下移,导致每个加载级下的峰值应力降低.由公式(3)可知,该阶段预训练试件的ξ_{eqv}高于未训练试件,但随着应变幅值的增大,两者之间的差距逐渐减小.当拉伸应变幅值超过预训练幅值6%后(7%~8%阶段),预训练试件的ξ_{eqv}明显降低.具体来说,NA试件在预训练后的ξ_{eqv}低于未训练试件,而预训练后的退火10 min试件ξ_{eqv}也逐渐降低并趋近于未训练试件.



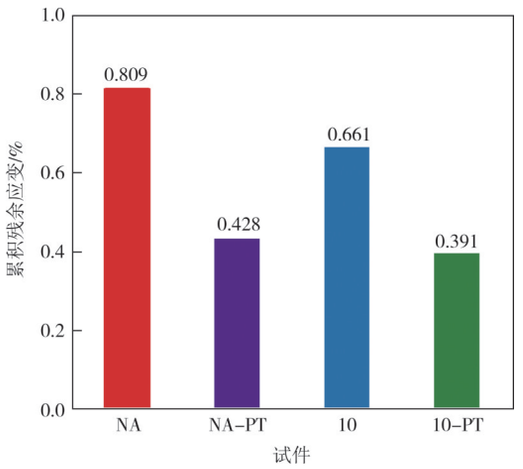
(a)屈服强度



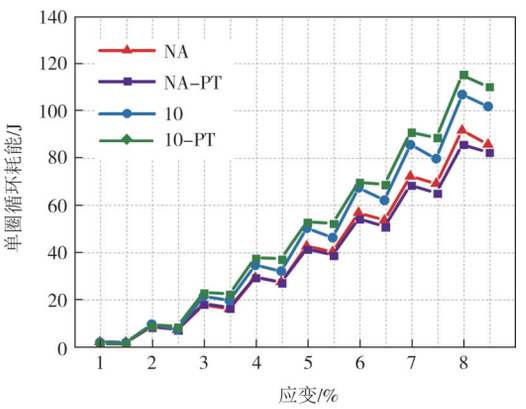
(b)割线刚度



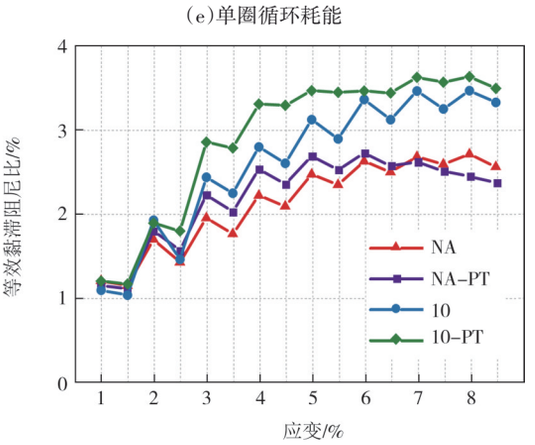
(c)单圈残余应变



(d)累积残余应变



(e)单圈循环耗能



(f)等效黏滞阻尼比

图 13　预训练对SMA绞线力学性能参数的影响

Fig.13　Effect of pre-training on mechanical properties of SMA cables

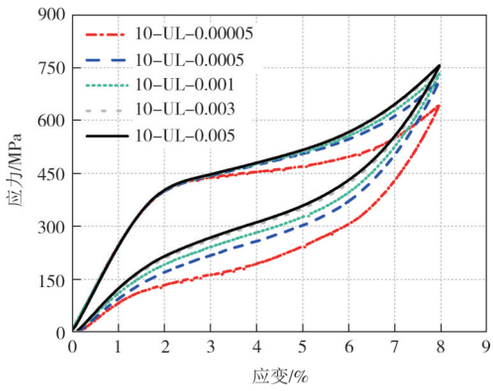
总的来说,经过一定次数的机械循环后,SMA绞线的屈服强度、残余应变、循环耗能等功能疲劳参数的退化程度减小.当拉伸应变幅值超过预训练应变幅值后,尽管SMA绞线的峰值应力会有一定的提升,其耗能能力却会降低.另外,SMA绞线的功能疲劳和结构疲劳与应变幅值密切相关.已有研究指出SMA的功能性退化与应变幅值呈正相关,即在较大的应

变幅值下,超弹性退化的现象更为明显[22]. 同时,SMA 绞线的应变幅值越大,对其疲劳寿命产生的不利影响也越大. 因此,SMA 绞线在较大应变幅值下进行预训练后,可能会降低其疲劳性能.

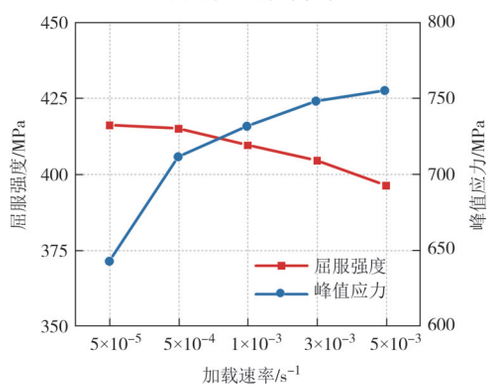
2.4 加载速率对 NiTi 形状记忆合金绞线超弹性的影响

图 14 呈现了加载速率为 5×10^{-5}~5×10^{-3} s^{-1} 的情况下,退火 10 min 试件的滞回曲线以及力学参数变化曲线. 从图 14(a)可以观察到,随着加载速率的增大,试件的滞回曲线呈现上移的趋势,峰值应力不断增大,正向和逆向的“屈服平台”升高,但逆向“屈服平台”变化幅度更大,导致试件的滞回环面积逐渐减小. 正向“屈服平台”的变形模量在加载速率增加时显著增大,而其他阶段的变形模量几乎不受加载速率的影响. 此外,当加载速率大于 5×10^{-4} s^{-1} 后,滞回环形态对加载速率的变化不敏感.

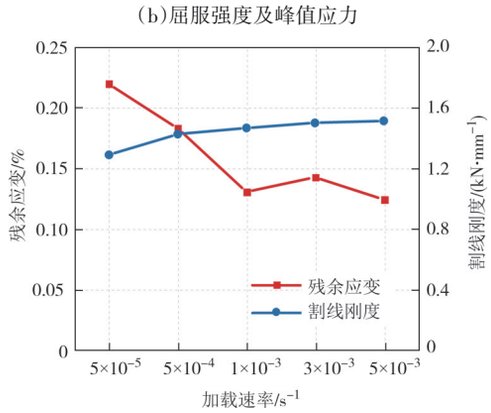
根据图 14(b)~14(d)的结果,在试验采用的加载速率范围内,随着加载速率的增加,试件的割线刚度 K_s 逐渐增大,相邻加载速率之间的增幅分别为 10.7%、2.8%、2.3% 和 1.0%,K_s 的变化幅度逐渐减小并趋于稳定. 因此,K_s 在加载速率大于 5×10^{-4} s^{-1} 后对加载速率的敏感性逐渐减弱. 屈服强度 σ_{Ms} 的整体变化幅度较小,在加载速率增加时呈现轻微下降. 相邻加载速率之间的降低幅度分别为 0.3%、1.3%、1.2% 和 2.0%. 然而,当加载速率大于 5×10^{-4} s^{-1} 时,降低幅度逐渐增大. 这是由于随着加载速率的增大,加载过程中 SMA 绞线无法与外界环境进行充分的热交换,因此材料内部温度上升. 相变过程中的潜热会引起材料内部温度场的变化,而卸载过程中奥氏体相变的吸热会导致材料温度下降,从而影响其力学性能. 这一现象在 SMA 材料屈服平台阶段体现为切线模量和马氏体应力的上升[13]. 试件的残余应变 ε_{res} 随着加载速率增大逐渐减小,并在加载速率大于 1×10^{-3} s^{-1} 后逐渐稳定在 0.13%. 单圈循环耗能 W_D 随着加载速率的增加呈递减趋势,这与滞回环面积随着加载速率的增加而减小密切相关. 当加载速率由 5×10^{-5} s^{-1} 增至 5×10^{-3} s^{-1} 时,W_D 减小了 43.96 J,降幅达 30.7%. 试件的等效黏滞阻尼比 ξ_{eqv} 的变化规律与 W_D 相似,当加载速率由 5×10^{-5} s^{-1} 增至 5×10^{-3} s^{-1} 时,ξ_{eqv} 减小了 1.97 个百分点,降幅达 41.1%.



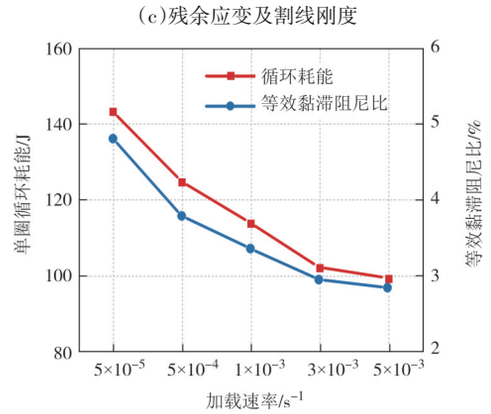
(a)应力-应变曲线



(b)屈服强度及峰值应力



(c)残余应变及割线刚度



(d)单圈循环耗能及等效黏滞阻尼比

图 14 不同加载速率下 SMA 绞线的滞回曲线及力学参数变化曲线

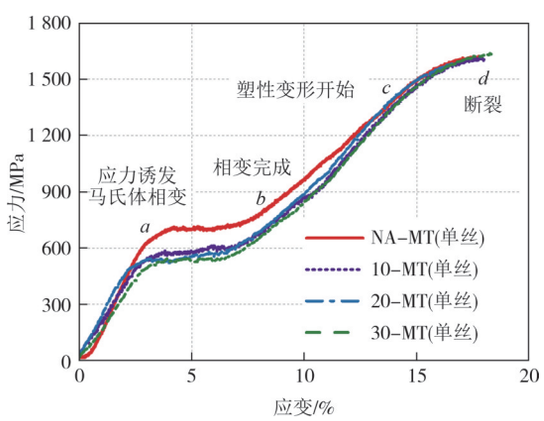
Fig.14 Hysteresis curve and mechanical parameter variation curves of SMA cable under different loading rates

3　NiTi形状记忆合金绞线的单调加载响应

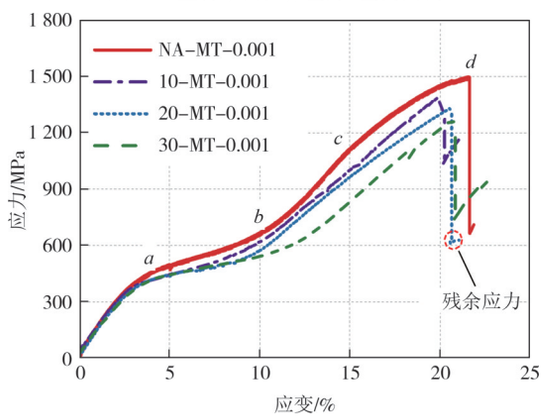
图 15 为不同热处理方案下 SMA 丝材和 SMA 绞线在单调拉伸条件下的应力-应变曲线. 通过比较图 15(a)和 15(b),可以明显观察到绞线与丝材在各个相变阶段存在显著的差异. 以 NA-MT 下的 SMA 丝材和绞线为例,分析它们在单调拉伸作用下的应力-应变曲线差异. 最初,在 a 点之前,由于奥氏体 SMA 的弹性变形,曲线呈线性变化. 需要注意的是,丝材的奥氏体弹性模量明显高于绞线;在 a 点处,SMA 开始诱发马氏体相变,即在应力作用下,SMA 内部稳定的奥氏体相开始向马氏体相转变. 此外,在该点处绞线的马氏体开始应力低于丝材;从 a 点到 b 点的应变增量是由应力诱发的马氏体相变引起的,在这个过程中,随着马氏体相不断增加,SMA 的弹性模量显著降低,应力-应变曲线出现了应力平台,类似于塑性屈服. 然而,SMA 绞线的应力平台斜率更大,这是因为绞线的构造形式使内部各 SMA 丝材的应力发展不同步,从而使马氏体正相变阶段的弹性模量(即“屈服刚度”)高于 SMA 丝材;在 b 点处,试件中的奥氏体几乎已经全部转变为马氏体. 因此,从 b 点到 c 点是由马氏体相的弹性变形引起的;从 c 点开始,马氏体发生屈服,一直持续到 d 点,试件达到了极限变形,在该阶段,与 SMA 丝材相比,SMA 绞线在断裂之前的马氏体硬化现象不明显.

从图 15(a)可以观察到,在经过热处理后,SMA 丝材的屈服平台降低,但抗拉强度和延伸率没有明显的变化. 此外,对于在 400 ℃下退火 10、20、30 min 的试件,SMA 丝材的屈服平台、抗拉强度和延伸率基本趋于一致,这表明退火时间对 SMA 丝材的单轴拉伸性能影响较小. SMA 丝材的极限变形为 17.6%,抗拉强度为 1 625 MPa.

图 15(b)为 SMA 绞线在不同热处理方案下的单调拉伸曲线. 与 SMA 丝材相比,经过热处理后的试件,在马氏体弹性段至断裂点的应力随着退火时间的增加而逐渐降低,退火 30 min 试件的断裂应力相对于 NA 试件更低. 这表明不仅锚固体系会影响 SMA 绞线的拉伸响应[16],热处理方案也会导致 SMA 绞线在拉伸过程中的最大抗拉强度和破坏延伸率不同. 另外,图 15(b)中的 SMA 绞线都存在一定的残余应力,这是因为 SMA 绞线的破坏并非突然断裂,而是其中几根边束先发生失效导致承载力降低,剩余的 SMA 束仍能继续承载,具有良好的鲁棒性. SMA 绞线的极限变形范围在 19.9%~21.6%,抗拉强度为 1 259~1 489 MPa. 因此,SMA 绞线的极限变形大于 SMA 丝材,表现出更好的延性. 与 SMA 绞线在循环拉伸过程中的极限应变相比[16],单轴拉伸下的极限应变更大. 此外,已有研究表明 SMA 绞线的单轴拉伸结果与本研究中的绞线极限应变十分接近[25]. 这表明采用的锚固系统具有良好效果,绞线达到了预期的破坏模式并具有良好的变形能力. SMA 绞线的极限应力低于 SMA 丝材的原因在于绞线的断裂主要发生在锚固端附近(如图 16 所示). 锚固端的机械挤压作用使得这一区域应力集中现象较为明显,从而导致试件在达到其真正极限应力之前就已经被拉断. 因此,测得的破坏应力可能被视为下限值. 为了消除该部位的应力集中,可通过对锚固段末端进行圆弧过渡或对 SMA 绞线插入端包裹环氧树脂,以避免在冷压过程中出现应力集中现象,使锚固段内的绞线均匀受力,提高绞线的极限变形能力.



(a)SMA 丝材单调拉伸应力-应变曲线



(b)SMA 绞线单调拉伸应力-应变曲线

图 15　不同热处理方案下 SMA 丝材和 SMA 绞线的单调拉伸应力-应变曲线

Fig.15　The monotonic tensile stress-strain curves of SMA wire and SMA cable under different heat treatment strategies

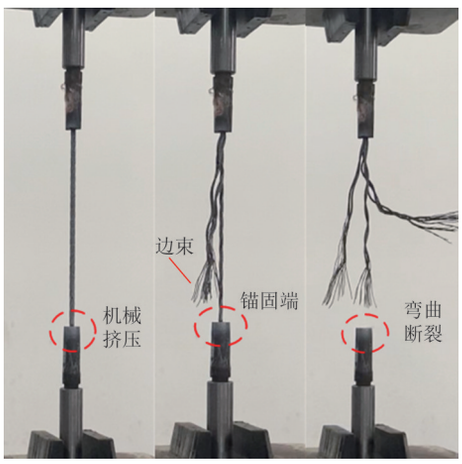


图 16 SMA 绞线断裂发展顺序

Fig.16 The fracture development order of SMA cable

4 结 论

本文通过对单丝直径 1.0 mm 的 7×7 构型超弹性 SMA 绞线进行循环拉伸试验和单轴拉伸试验,探究了热处理方案、应变幅值、循环加载次数、预训练、加载速率等因素对 SMA 绞线力学性能的影响. 同时,还进行了不同退火时间下的 SMA 绞线和 SMA 丝材的抗拉强度和延伸率的对比分析. 得到如下结论:

1)对于单丝直径 1.0 mm 的 7×7 构型 SMA 绞线,在热处理为 400 ℃,退火 10 min 后,表现出良好的强度、刚度和耗能能力,应变回复率达到 91.7%;过长的退火时间会显著削弱 SMA 绞线的强度和恢复能力. 随着循环次数和应变幅值的增加,相变平台的高度持续降低,逆相变平台的降低幅度更大.

2)随着循环加卸载次数的增加,SMA 绞线的屈服应力、割线刚度、单圈循环耗能、等效黏滞阻尼比逐渐降低,残余应变累积增加. SMA 绞线的力学性能参数经过 20 次循环后趋于极限值.

3)通过循环拉伸训练,可以有效降低 SMA 绞线的退化程度并减小残余应变;未经热处理的试件通过预训练后残余应变降低了 47%,退火 10 min 的试件通过预训练后残余应变降低了 41%.

4)加载速率大于 5×10^{-4} s^{-1} 后,SMA 绞线的滞回环形态对加载速率不敏感. 随着加载速率的增大,SMA 绞线单圈循环耗能逐渐减小,而峰值应力增大. 加载速率由 5×10^{-5} s^{-1} 增加至 5×10^{-3} s^{-1},SMA 绞线的单圈循环耗能和等效黏滞阻尼比分别降低了 30.7% 和 41.1%.

5)SMA 绞线相比 SMA 丝材具有更高的极限应变、更充足的承载能力以及更好的鲁棒性;SMA 绞线的初始刚度和马氏体开始应力远小于 SMA 丝材,但在马氏体正相变阶段的弹性模量大于 SMA 丝材. 经过热处理后,SMA 丝材的屈服平台降低,但抗拉强度和延伸率没有明显的变化.

参考文献

[1] MENNA C, AURICCHIO F, ASPRONE D. Applications of shape memory alloys in structural engineering[M]//Shape Memory Alloy Engineering. Amsterdam:Elsevier, 2015: 369-403.

[2] 邱灿星, 杜修力. 自复位结构的研究进展和应用现状[J]. 土木工程学报, 2021, 54(11): 11-26.
QIU C X, DU X L. A state-of-the-art review on the research and application of self-centering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 11-26.(in Chinese)

[3] OZBULUT O E, HURLEBAUS S, DESROCHES R. Seismic response control using shape memory alloys: a review[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(14): 1531-1549.

[4] LI T, WANG S L, YANG T. Experiment and simulation study on vibration control of an ancient pagoda with damping devices[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2018, 18(10): 1850120.

[5] 胡淑军, 顾琦, 姜国青, 等. 一种新型自复位 SMA 支撑的抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(1): 109-118.
HU S J, GU Q, JIANG G Q, et al. Experimental study on seismic performance for an innovative self-centering SMA brace [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(1): 109-118.(in Chinese)

[6] 韩建平, 章全才. 新型自复位黏弹性阻尼支撑力学性能研究[J]. 工程力学, 2021, 38(1): 195-204.
HAN J P, ZHANG Q C. The investigation on mechanical behavior of a new-type self-centering viscoelastic damping brace [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(1): 195-204.(in Chinese)

[7] FANG C, YAM M C H, MA H W, et al. Tests on superelastic Ni-Ti SMA bars under cyclic tension and direct-shear: towards practical recentring connections [J]. Materials and Structures, 2015, 48(4): 1013-1030.

[8] NING Q J, ZHU L H, HAN W, et al. Experimental study on mechanical properties of large NiTi superelastic shape memory alloy bars[J]. Smart Material Structures, 2022, 31(1): 015024.

[9] 钱辉, 裴金召, 李宗翱, 等. 基于 SMA/ECC 的新型自复位框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(11): 64-73.
QIAN H, PEI J Z, LI Z A, et al. Experimental study on seismic performance of self-centering beam-column joints reinforced with superelastic SMA and ECC[J]. China Civil Engineering Journal,

2020, 53(11): 64-73.(in Chinese)

[10] SPEICHER M, HODGSON D E, DESROCHES R, et al. Shape memory alloy tension/compression device for seismic retrofit of buildings[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2009, 18(5): 746-753.

[11] WANG W, FANG C, ZHANG A, et al. Manufacturing and performance of a novel self-centring damper with shape memory alloy ring springs for seismic resilience[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(5): e2337.

[12] WANG B, ZHU S Y, CHEN K X, et al. Development of superelastic SMA angles as seismic-resistant self-centering devices[J]. Engineering Structures, 2020, 218: 110836.

[13] OZBULUT O E, DAGHASH S, SHERIF M M. Shape memory alloy cables for structural applications[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(4): 04015176.

[14] SHERIF M M, OZBULUT O E. Tensile and superelastic fatigue characterization of NiTi shape memory cables[J]. Smart Material Structures, 2018, 27(1): 015007.

[15] FANG C, ZHENG Y, CHEN J B, et al. Superelastic NiTi SMA cables: thermal-mechanical behavior, hysteretic modelling and seismic application [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 533-549.

[16] SHI F, ZHOU Y, OZBULUT O E, et al. Development and experimental validation of anchorage systems for shape memory alloy cables[J]. Engineering Structures, 2021, 228: 111611.

[17] SHI F, OZBULUT O E, LI Z, et al. Effects of ambient temperature on cyclic response and functional fatigue of shape memory alloy cables[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 52: 104340.

[18] SHI Y F, QIAN H, KANG L P, et al. Cyclic behavior of superelastic SMA cable and its application in an innovative self-centering BRB[J]. Smart Material Structures, 2021, 30(9): 095019.

[19] REEDLUNN B, DALY S, SHAW J. Superelastic shape memory alloy cables: part Ⅰ-isothermal tension experiments[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(20/21): 3009-3026.

[20] BIGGS D B, SHAW J A. Experimental characterization of shape memory alloy actuator cables [C]//Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2016. Las Vegas, Nevada: SPIE, 2016: 79-90.

[21] EVIRGEN A, KARAMAN I, PONS J, et al. Role of nano-precipitation on the microstructure and shape memory characteristics of a new $Ni_{50.3}Ti_{34.7}Zr_{15}$ shape memory alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 655: 193-203.

[22] YANG X, ZHOU H J, YANG X, et al. Shape memory alloy strands as cross-ties: fatigue behavior and model-cable net tests[J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112828.

[23] EGGELER G, HORNBOGEN E, YAWNY A, et al. Structural and functional fatigue of NiTi shape memory alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 378(1/2): 24-33.

[24] QIAN H, WEI D X, SHI Y F, et al. Pre-tensioned SMA cable tests and its application in a novel self-centering viscoelastic damper[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2023, 168: 107850.

[25] MAS B, BIGGS D, VIEITO I, et al. Superelastic shape memory alloy cables for reinforced concrete applications[J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 307-320.