镍钛基形状记忆合金板材的力学性能与应力恢复行为试验研究

叶 茂[1,2] 陈 涛[1,2,*] 李轩威[1,2,3] 张向峰[4]

（1.同济大学工程结构性能演化与控制教育部重点实验室，上海 200092；2.同济大学建筑工程系，上海 200092；
3.厦门路桥工程投资发展有限公司，厦门 361009；4.北京记一科贸有限责任公司，北京 100095）

摘 要 形状记忆合金（SMA）的应用为结构预应力加固提供了一种便捷的解决方案。本文针对2组国产的镍钛基SMA板材（NiTi-SMA和NiTiNb-SMA）分别开展了静力拉伸试验研究，得到了2种SMA的力学性能指标，并通过热激发恢复试验探索了其应力恢复行为。研究发现，NiTiNb-SMA板相比NiTi-SMA板具备更高的恢复应力，最高为448.6 MPa，对应的最优热激发策略为8%的预拉伸应变与180 ℃的热激发温度；其应力恢复行为的影响因素及影响机理得到了初步解释。本文研究的NiTiNb-SMA板的最大恢复应力超过国际平均水平约50 MPa，且能够通过适中的热激发温度产生较高的恢复应力，一定程度上更适合于粘贴SMA加固系统的应用。

关键词 形状记忆合金，镍钛基，应力恢复行为，恢复应力，结构预应力加固

中图分类号：TG139.6；TU394 **文献标志码**：A **DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0013

Experimental Study on Mechanical Properties and Stress Recovery Behavior of NiTi-Based SMA Plates

YE Mao[1,2] CHEN Tao[1,2,*] LI Xuanwei[1,2,3] ZHANG Xiangfeng[4]

（1.Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2.Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3.Xiamen Road and Bridge Engineering Investment Development Co., Ltd., Xiamen 361009, China;
4.Beijing GEE SMA Technology Co.,Ltd., Beijing 100095, China）

Abstract The application of shape memory alloy (SMA) offers a convenient solution for structural prestressed strengthening. With two groups of Chinese-made NiTi-based SMA plates (NiTi-SMA and NiTiNb-SMA), static tensile tests were conducted to characterize their mechanical properties, while thermal activation recovery tests were carried out to study their stress recovery behavior. The NiTiNb-SMA plate shows higher recovery stress than the NiTi-SMA plate with a maximum value of 448.6 MPa while prestrained at 8% and thermally activated at 180 ℃, which is the optimal thermal activation strategy. The influencing factors of the stress recovery behavior and their mechanism have been preliminarily analysed. The highest recovery stress of this NiTiNb-SMA plate exceeds the average value of its international level by about 50 MPa. Besides, the NiTiNb-SMA plate can generate sufficient recovery stress under a moderate thermal activation temperature. Therefore, to some extent, it is a suitable candidate for the application of the bonded SMA strengthening system.

收稿日期：2024-12-30

基金项目：国家自然科学基金面上项目（51978509）

作者简介：叶 茂（1997-），男，博士研究生，研究方向为结构预应力加固。E-mail：timye@tongji.edu.cn

[*] **联系作者**：陈 涛（1980-），男，博士，教授，博士生导师，研究方向为结构工程。E-mail：t.chen@tongji.edu.cn

Keywords　shape memory alloy (SMA), Nickel-Titanium based (NiTi-based), stress recovery behavior, recovery stress, structural prestressed strengthening

0　引　言

结构在长期服役期间,受荷载和服役环境等因素作用,结构性能将退化。因此,需要通过加固提升结构性能,从而延长结构服役寿命;其中,预应力加固是一种常用且有效的结构加固方式。

形状记忆合金(SMA)是一种功能性金属材料,具备独特的形状记忆效应(SME)。利用这一特性,通过便捷的热激发,SMA 产生的恢复应力能为结构提供主动的预应力加固效果,并提升结构的承载力、延性和抗疲劳能力[1]。一些传统的预应力加固方式,不免依赖千斤顶等大型装置,且需要充足的操作施工空间;与之相比,SMA 预应力加固提供了一种更便捷、适用范围更广的替代方案,因此该研究方向受到国内外研究人员的持续关注[2]。

在土木工程领域中,应用相对广泛的SMA有两大类:镍钛基SMA和铁基SMA,其中前者发展时间较长。考虑到SMA预应力加固的效率,值得关注的前提条件应包括如下两个方面:

一方面,SMA是否能通过热激发产生足够的恢复应力(回到室温时),是一个重要前提。十多年前,瑞士 Empa 研究所研发的 Fe-SMA 备受关注,大量研究[3-4]表明这种 Fe-SMA 能产生较高的恢复应力,并应用于土木工程领域[5-6]。近年来,采用 NiTi-SMA 丝[7-8]与 NiTiNb-SMA 丝[9-12]进行结构预应力加固,也均有一些成功案例。NiTi-SMA 的恢复应力的上限相对偏低,然而加入 Nb 形成改性三元合金 NiTiNb-SMA 后,可以大幅度增强其 SME[13];一些针对 NiTiNb-SMA 丝的研究[14-15]证实了 NiTiNb-SMA 丝在应力恢复行为方面有很强的竞争力,也可应用于混凝土约束加固[16]等方面。SMA 的产品形式对于加固应用的效果、方法和适用场景等,均存在一定影响;相对于丝材而言,板材通常可具备更大的截面积,有机会为结构带来更充分的加固效果;此外,相比于丝材的圆形截面,板材的矩形截面使得SMA加固的预处理(如拉伸、表面处理等)流程明显更加便捷。SMA 丝材与 SMA 板材的加工工艺不同,丝材为轴向拉伸,而板材为双向轧制;即使化学组分相同,丝材与板材的材料性能也必有所差异。然而,尽管重要,关于 NiTiNb-SMA 的现有研究几乎仅关注丝材,而针对板材的研究目前仍相当有限。

另一方面,值得探讨的是SMA与被加固结构之间的连接方式。对于结构加固,以钢结构为代表的,最先发展的预应力SMA加固系统分别基于栓钉锚固[17-18]与机械锚固[19-20];尽管加固效果可观,但这些加固系统的夹具复杂且重量较大,甚至加固过程可能对母体结构造成损伤。2021年,一种基于 Fe-SMA 的新型粘贴式预应力 SMA 加固(后均称为粘贴SMA加固)系统被首次提出[21],并在近年逐步得到验证[22-24],这种加固方式不再依赖夹具,又是无损加固,相比上述的SMA加固系统体现出显著优势。粘贴SMA加固系统的重要载体是结构胶粘剂,作为连接SMA与钢材的关键材料,其性能直接影响到加固效果的稳定性和耐久性。由于结构胶粘剂是一种温度敏感的材料,考虑到SMA的热激发过程经历高温,为避免过高温度致使粘贴锚固区域的胶层软化,相对较低的热激发温度对于保持SMA与钢材间的界面粘结强度是有利的。

综合以上两方面,对于颇具前景的新型粘贴SMA加固(钢结构)系统而言,一种能在适中的热激发温度下产生充分恢复应力的SMA板材,将兼顾:①预应力加固效率;②粘贴SMA加固系统的适配性。因此,本文针对2款国产的镍钛基SMA板材(NiTi-SMA和NiTiNb-SMA)分别开展了试验研究,通过静力拉伸试验测试其(室温下的)力学性能,并通过热激发恢复试验探索其应力恢复行为。本文旨在对可能适配于粘贴SMA加固系统的镍钛基SMA板材进行材料选型,并表征其应力恢复行为指标、提供其最优的热激发策略。

1　NiTi-SMA板的试验研究

1.1　试件设计

NiTi-SMA板的厚度为1.5 mm,由苏州海川稀有金属制品有限公司供应。按照原子比,该NiTi-SMA板的元素成分为56.5%的Ni和43.5%的Ti;

板材为热轧板，以350 ℃退火30 min。为准确得到NiTi-SMA板的力学性能参数（如弹性模量、抗拉强度等），开展了（室温）静力拉伸试验。根据《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》（GB/T 228.1—2021）[25]设计了狗骨试件，如图1(a)所示。为获取NiTi-SMA的应力恢复行为，开展了热激发恢复试验，试件设计如图1(b)所示。所有试件由整板激光切割得到，未考虑切割位置的影响。

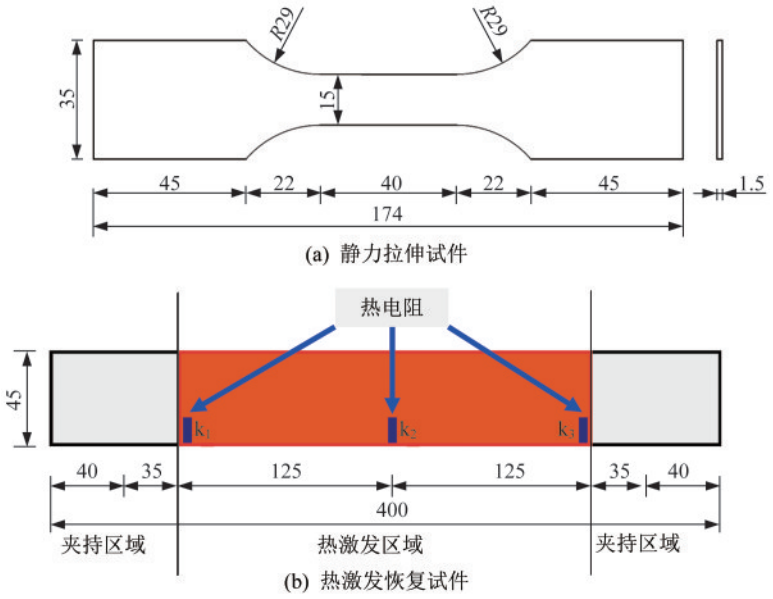


图1 NiTi-SMA试件尺寸（单位：mm）

Fig.1 Geometry of NiTi-SMA specimens (Unit in mm)

1.2 试验流程

静力拉伸试验采用位移控制的加载模式，参考《镍钛形状记忆合金记忆性能测试方法 第1部分：拉伸测试方法》（YS/T 1307.1—2019）[26]，选取推荐的拉伸速率为2 mm/min。试件变形由引伸计测量，试件两侧中央各布置一枚应变片，试验装置如图2(a)所示。

热激发恢复试验采用MTS液压伺服疲劳试验机，加载上限为250 kN；试验装置如图2(b)所示，相应的试验流程如图2(c)所示。试件端部由试验机夹持，在热激发之前，试件经过预拉伸（包括加载与卸载），产生不同的预拉伸应变，该过程位移加载速率所对应的名义应变速率为2×10^{-4}/s；预拉伸的温度约为10 ℃（冬季室温）。通过对吸的耐温磁铁将两块硅胶加热板固定在试件两侧的热激发区域，并通过加热板进行可控温的热激发。沿试件长度方向布置3个热电阻，用于监测试件表面温度。试件分组见表1，研究参数包括：3种预拉伸应变（4%，6%，8%），4种热激发温度（120 ℃，140 ℃，160 ℃，180 ℃）。

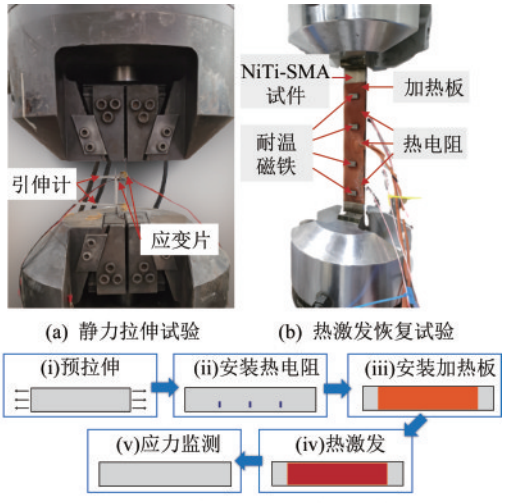


图2 NiTi-SMA试验装置

Fig.2 Test set-up for NiTi-SMA specimens

2 NiTiNb-SMA板的试验研究

2.1 试件设计

NiTiNb-SMA板的厚度为1.5 mm，由北京记一科贸有限责任公司供应。按照原子比，该NiTiNb-SMA板的元素成分为47%的Ni，44%的Ti，以及9%的Nb；板材为温轧板，以500 ℃退火10 min。

表 1　NiTi-SMA 的热激发恢复试验结果

Table 1　Results of thermal activation recovery tests of NiTi-SMA

试件编号	预拉伸应变 ε_{pre}/%①	最大拉伸应力 σ_{max} /MPa	残余应变 ε_{res}/%	热激发温度 T_{act}/℃	恢复应力 σ_{recov}/MPa
NiTi-A-1	4	242.2	3.03	120	130.0
NiTi-A-2		265.9	2.88	140	133.6
NiTi-A-3	6	335.9	4.76	120	84.0
NiTi-A-4		370.9	4.74	140	168.2
NiTi-A-5		341.9	4.71	160	184.9
NiTi-A-6		407.8	4.62	180	183.4
NiTi-A-7	8	570.6	5.27	120	108.8
NiTi-A-8		575.0	5.10	140	122.2
NiTi-A-9		529.5	5.17	160	110.6

注：①此为名义值，由预拉伸位移换算得到；真实值将有所折减。

分别开展了（室温）静力拉伸试验与热激发恢复试验。设计了 NiTiNb-SMA 狗骨试件，如图 3 所示；试件端部设置适当尺寸的圆孔，以适配热激发恢复试验的试验装置。所有试件来源于同批次，由整板线切割得到，未考虑切割位置的影响。

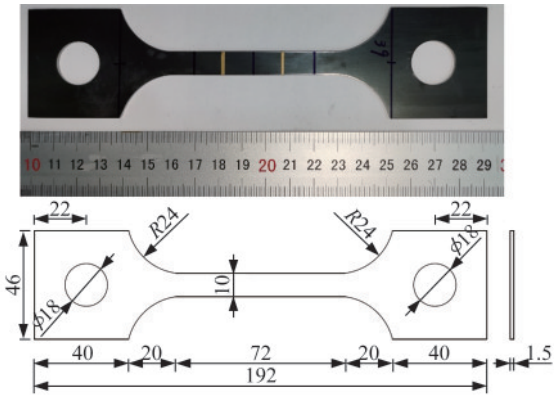
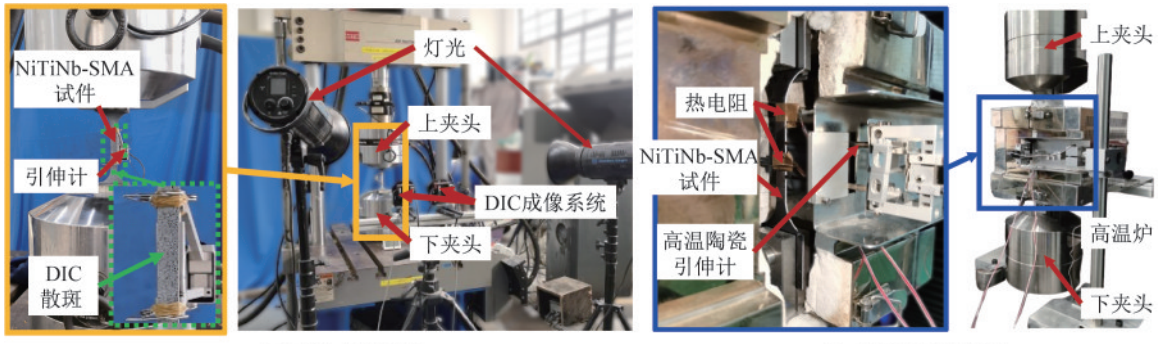


图 3　NiTiNb-SMA 试件尺寸（单位：mm）

Fig.3　Geometry of NiTiNb-SMA specimens (Unit in mm)

2.2　试验流程

静力拉伸试验采用的试验机为 MTS 液压伺服疲劳试验机，加载上限为 250 kN。采用位移控制的加载模式；选取 NiTiNb-SMA 丝材相关研究[27]推荐的名义应变速率 2×10^{-4}/s，对应的位移速率为 0.864 mm/min。通过 3D-DIC 装置和引伸计测量试件变形，试验装置如图 4（a）所示。此外，作为激发恢复试验的前置步骤，以相同加载速率开展了试件的预拉伸，涉及 6 种预拉伸应变（4%，6%，8%，10%，12%，16%）；预拉伸的温度约为 10 ℃（冬季室温）。



(a) 静力拉伸试验　　(b) 热激发恢复试验

图 4　NiTiNb-SMA 试验装置

Fig.4　Test set-up for NiTiNb-SMA specimens

热激发恢复试验采用的试验机为 LSI 单轴拉伸试验机，加载上限为 100 kN。试验装置如图 4（b）所示，试件两端通过圆柱形销钉穿过试件的预留圆孔连接至试验机的延长杆，试件整体通过独立工作的高温炉进行热激发；试件中央设置热电阻，用于监测试件表面温度和辅助调控炉温；采用高温陶瓷引伸计测量试件变形，并辅助调控试件在热激发期间保持恒定应变状态。为紧持试件，在热激发前对所有试件施加了 20 MPa 的初始预紧拉力（除试件 NiTiNb-A-13 采用 50 MPa）。高温炉的加热范围覆盖整个试件以及延长杆的非夹持段，通过逐级提升设置温度加热试件，直至试件中央温度达到目标的热激发温度（平均升温速率为 12~24 ℃/min），随后关闭高温炉使试件自然冷却至室温。试件分组如表 2 所示，除了前述的 6 种预拉伸应变，还探究了 4 种热激发温度（120 ℃，180 ℃，240 ℃，300 ℃）的影响。

表 2 NiTiNb-SMA 的热激发恢复试验结果

Table 2 Results of thermal activation recovery tests of NiTiNb-SMA

试件编号	预拉伸应变 ε_{pre}/%	最大拉伸应力 σ_{max}/MPa	残余应变 ε_{res}/%	热激发温度 T_{act}/℃①	恢复应力 σ_{recov}/MPa
NiTiNb-A-1	4	587.3	2.31	120	295.9
NiTiNb-A-2		588.0	2.26	180	344.9
NiTiNb-A-3		586.9	2.36	240	343.9
NiTiNb-A-4	6	612.5	3.85	180	375.3
NiTiNb-A-5	8	630.5	5.65	120	341.0
NiTiNb-A-6		639.5	5.61	180	448.6
NiTiNb-A-7		603.5	5.75	240	438.4
NiTiNb-A-8②		616.8	5.59	300	410.9
NiTiNb-A-9	10	703.6	7.43	120	355.2
NiTiNb-A-10		655.4	7.43	180	414.2
NiTiNb-A-11③		660.5	7.44	180	409.2
NiTiNb-A-12④		678.3	7.42	180	428.2
NiTiNb-A-13⑤		693.0	7.22	180	408.0
NiTiNb-A-14		666.8	7.43	240	440.9
NiTiNb-A-15	12	694.7	9.03	180	375.3
NiTiNb-A-16	16	778.3	12.63	120	273.2
NiTiNb-A-17		778.2	12.65	180	330.8
NiTiNb-A-18		786.8	12.64	240	380.4

注：①每个试件的平均升温速率为 12~24 ℃/min。

②热激发后，监测 12 h 的恢复应力，其数值基本恒定。

③缓慢升温，平均升温速率约为 9 ℃/min。

④ 快速升温，平均升温速率约为 41 ℃/min。

⑤ 该试件的初始预紧力为 50 MPa，对于绝大多数试件均为 20 MPa。

3 试验结果分析与讨论

3.1 力学性能

NiTi-SMA 板的静力拉伸试验的工程应力-应变曲线如图 5(a)所示，对应的力学性能参数汇总于表 3。

通过 NiTi-SMA 应力-应变曲线的初始切线得到弹性模量为 24.1~33.2 GPa，平均值为 28.7 GPa。整个曲线呈现出三段式发展，斜率先减后增，中间段存在一个应力平台，根据斜率变化的区间，可大致确定应力平台的范围为 150~270 MPa；应力平台后，NiTi-SMA 产生少量的塑性流动与强化。NiTi-SMA 的断裂伸长率平均为 6.5%，抗拉强度均值高达 950 MPa，说明其承载能力优秀但延展性一般。

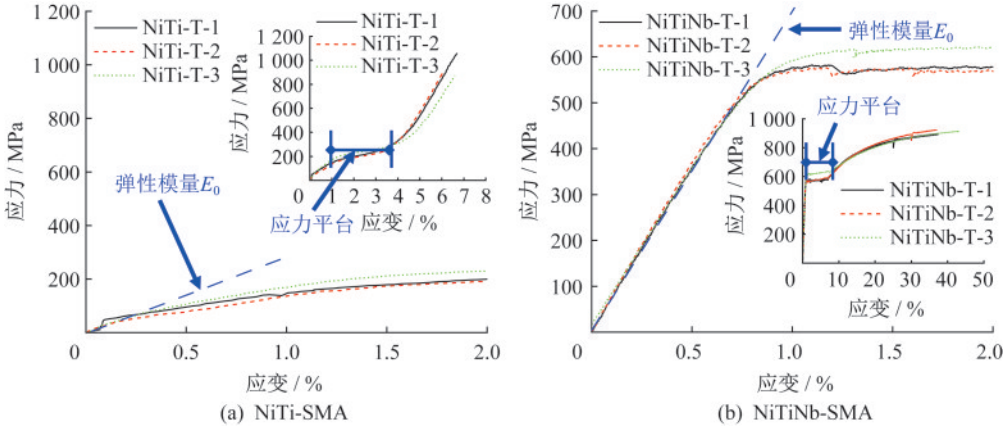


图 5 NiTi-SMA 和 NiTiNb-SMA 静力拉伸试验的工程应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain behavior of static tensile tests of NiTi-SMA and NiTiNb-SMA

NiTiNb-SMA板的静力拉伸试验的工程应力-应变曲线如图5(b)所示,对应的力学性能参数也汇总于表3。

表3　NiTi-SMA和NiTiNb-SMA的力学性能(静力拉伸试验结果)

Table 3　Mechanical properties of NiTi-SMA and NiTiNb-SMA

试件编号	弹性模量E_0/GPa	应力平台/MPa	断裂伸长率ε_u/%	抗拉强度σ_u/MPa
NiTi-T-1	33.2	148~270	6.7	1 058.66
NiTi-T-2	24.1	136~254	6.1	917.33
NiTi-T-3	28.7	169~281	6.6	872.88
NiTi平均值	28.7	—	6.5	949.62
NiTiNb-T-1	69.1	574~592	37.3	896.81
NiTiNb-T-2	69.9	569~596	37.0	925.64
NiTiNb-T-3	65.8	601~634	43.2	939.61
NiTiNb平均值	68.3	—	39.2	920.69

由NiTiNb-SMA应力-应变曲线的原点至500 MPa的割线得到弹性模量为65.8~69.9 GPa,平均值为68.3 GPa。曲线呈现出一段较长的应力平台,在600 MPa上下,对应的应变范围大致为1.2%~7%。应力平台后,曲线预示着材料强化。NiTiNb-SMA的断裂伸长率平均为39.2%,抗拉强度平均值高达921 MPa,表现出优秀的延展性与承载能力。

NiTi-SMA和NiTiNb-SMA的弹性模量均较小,大约分别为普通钢材弹性模量的1/7与1/3。在力学性能方面,两种SMA的一项主要差异在于应力平台;对于镍钛基SMA,该过程为应力诱发的马氏体相变,期间其内部晶相逐渐由孪晶马氏体转变为非孪晶马氏体;在拉伸应力的作用下,相对而言,NiTiNb-SMA有机会产生更充分的相变。

3.2　关于应力恢复行为的基本假定与说明

由于两种SMA的热激发恢复试验分两批次开展,且在试验设计与流程方面存在一定差异,因此本节将对一些可能的影响因素进行初步分析讨论,并作若干基本假定与说明。

(1)关于试件切割:每种SMA试件均由同批次SMA整板切割得到。尽管SMA整板的边缘与中部的热处理情况存在差异,且激光切割与线切割的温度影响范围不同,考虑到这些因素的影响区域相对于试件整体范围来说十分有限,因此可基本忽略试件切割位置与切割方式可能带来的影响。

(2)关于预拉伸:NiTiNb-SMA的预拉伸应变可通过引伸计与3D-DIC获得精确数值。而NiTi-SMA试件较宽,不便设置引伸计,其预拉伸应变为名义值,通过预拉伸位移换算得到;夹头位移误差等因素将导致NiTi-SMA的真实应变小于其名义值。

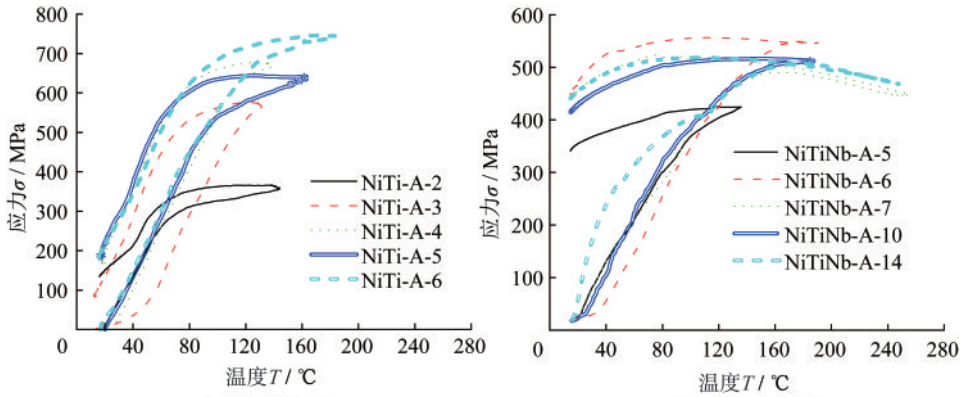
(3)关于热激发方式:NiTi-SMA(如图2所示,加热板)与NiTiNb-SMA(如图4所示,高温炉)有所不同。不同热激发方式对于SMA板试件的影响,可能主要包括两点:①温度速率;②温度的空间分布。一方面,SMA的形状记忆效应的发挥效果,与温度和相变点的差值密切相关,而与温度速率(理论上)不相关。另一方面,不同热激发方式可能引起温度空间分布的差异,而本研究在试验中通过在试件表面设置多个温度测点,发现两种热激发方式(加热板、高温炉)的温度空间分布都比较均匀,因此一定程度上可忽略这方面的影响。综合以上两方面,认为两种热激发方式(加热板、高温炉)对于SMA板材的应力恢复行为等相关结果的影响比较有限。

(4)关于位移边界条件:NiTi-SMA(端部位移约束)与NiTiNb-SMA(恒定应变)有所差异。对于NiTiNb-SMA试件,在高温炉的作用下,由于试验机延长杆也会受热膨胀,因此必须额外设置高温引伸计,通过应变补偿使得试件保持恒定应变状态,才可以使试件的热激发过程满足合适的位移边界条件。

(5)关于恢复应力的计算方式:在SMA试件经过热激发,并经冷却而基本回到室温时,该状态下的试件应力可记为其恢复应力;即,读取此时试验机的力值,并除以试件的截面积,可以得到试件的恢复应力。由于预拉伸后,试件的截面尺寸发生改变,为获取更精确的试件应力与恢复应力,试件的截面积应通过其预拉伸后的实际测量尺寸计算得到,而非基于设计值或初始测量值。

3.3 应力恢复行为

基于3.2节的若干基本假定与说明，NiTi-SMA板、NiTiNb-SMA板的热激发试验的主要结果分别汇总于表1、表2，典型的应力-温度曲线分别如图6(a)、图6(b)所示。



(a) NiTi-SMA (b) NiTiNb-SMA

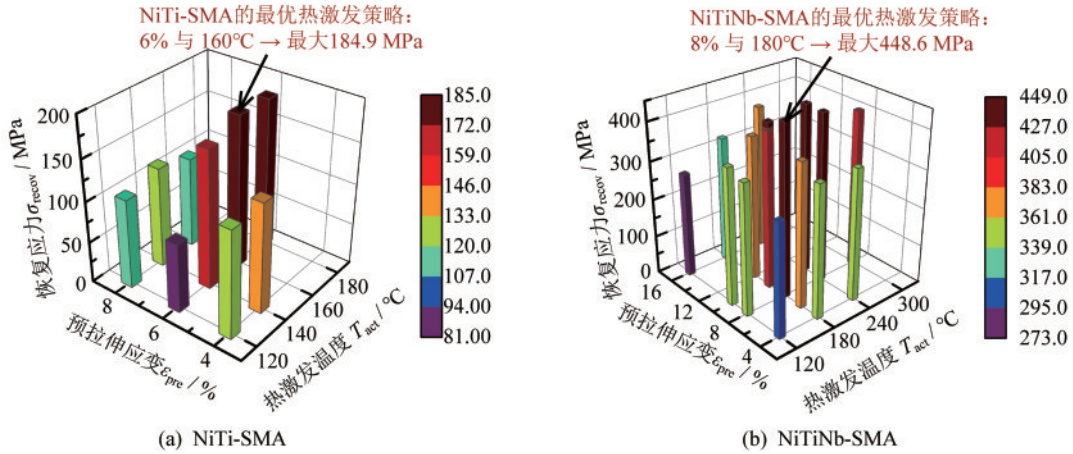
图6 典型的NiTi-SMA与NiTiNb-SMA热激发恢复试验的应力-温度曲线

Fig.6 Typical stress-temperature behavior of thermal recovery activation tests of NiTi-SMA and NiTiNb-SMA

试验结果表明：NiTi-SMA的应力在升温期间随温度正相关，能产生非常大的应力，但回到室温后该数值大幅衰减，体现出较低的恢复应力水平。当热激发温度小于180 ℃时，NiTiNb-SMA的应力也在升温期间随温度正相关，然而当热激发温度大于180 ℃时呈现先增后减，说明过高温度引起的热膨胀将抵消部分SME的恢复效果。虽然NiTiNb-SMA的峰值应力略逊于NiTi-SMA，但大部分应力都在回到室温后得以保留，整体上体现出较高的恢复应力水平。

图7(a)、图7(b)分别汇总了不同热激发工况下，NiTi-SMA与NiTiNb-SMA的恢复应力。恢复应力是一项重要的应力恢复行为指标，相比于NiTi-SMA，显然NiTiNb-SMA具备更出色的热激发恢复能力。

当预拉伸应变相同时，两种SMA的热激发温度与其恢复应力均未表现出正相关性，即更高的热激发温度未必带来恢复应力的增益。



(a) NiTi-SMA (b) NiTiNb-SMA

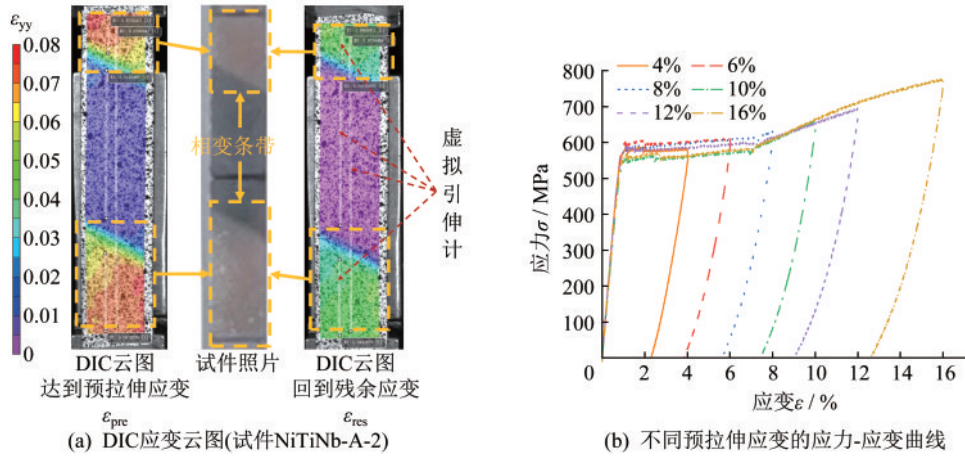
图7 不同热激发工况下的SMA恢复应力与最优热激发策略

Fig.7 Recovery stress of SMA under different thermal activation scenarios and the optimal thermal activation strategy

当预拉伸应变不同时，对于NiTi-SMA，总体上，6%的预拉伸应变可以支持其产生相对更大的恢复应力；而对于NiTiNb-SMA，为获得充足的恢复应力，其合适的预拉伸应变是8%或10%。这一数值更小或更大均将引起恢复应力的减益。此外，在试验工况范围内，NiTi-SMA的恢复应力最高可达到184.9 MPa，对应的最优热激发策略是6%的预拉伸应变和160 ℃的热激发温度；对于NiTiNb-SMA，恢复应力最高可达到448.6 MPa，对应的最优热激发策略是8%的预拉伸应变和

180 ℃的热激发温度。

不同预拉伸应变对于SMA恢复应力有着显著影响，其影响机理可以通过其预拉伸过程得到解释。以NiTiNb-SMA为例，图8展示了其预拉伸过程概况。如图8(a)所示，以试件NiTiNb-A-2为代表，其预拉伸期间的DIC应变云图表明试件应变发展存在局部化现象，呈现出不同金属色泽的相变条带；4%的预拉伸应变将使试件产生局部应变约为1%的相变条带，而其余部分的局部应变则达到8%以上。换言之，只有当试件的预拉伸应变超过8%时，相变条带才可能被充分拉伸，试件才能整体充分相变。由图8(b)的预拉伸应力-应变曲线可知：一方面，8%与10%的预拉伸应变恰好超出了应力平台的应变范围，这确保了应力诱发马氏体的相变过程是完整且充分的，保证了SME的高效发挥；另一方面，超过10%的预拉伸应变将使NiTiNb-SMA进入强化阶段，此时进一步累积的塑性应变对于SME似乎是不利的。



(a) DIC应变云图(试件NiTiNb-A-2)　　(b) 不同预拉伸应变的应力-应变曲线

图8　NiTiNb-SMA预拉伸过程概况

Fig.8　Profile of the prestraining process of NiTiNb-SMA

3.4　关于SMA板恢复应力的案例分析

根据国内外学者对Fe-SMA板的研究结果[3-4,18,28-35]，统计了各研究中的最大恢复应力及其对应的热激发温度，汇总于图9，并与本文NiTiNb-SMA板的试验研究结果进行比对。可以发现，Fe-SMA板的恢复应力呈现出若干梯队，较好的可以实现接近600 MPa的恢复应力，多数结果在350~450 MPa范围，而较弱的约300 MPa。相比之下，本文的NiTiNb-SMA板的最大恢复应力约450 MPa，该数值已超过国际平均水平约50 MPa。

从另一角度出发，本文的NiTiNb-SMA板能通过较低的热激发温度，产生较高的恢复应力，从而可以兼顾预应力加固效率、粘贴SMA加固系统的适配性。因此对于粘贴SMA加固系统的SMA材料选型，本文研究的NiTiNb-SMA板将具备一定优势与潜力。

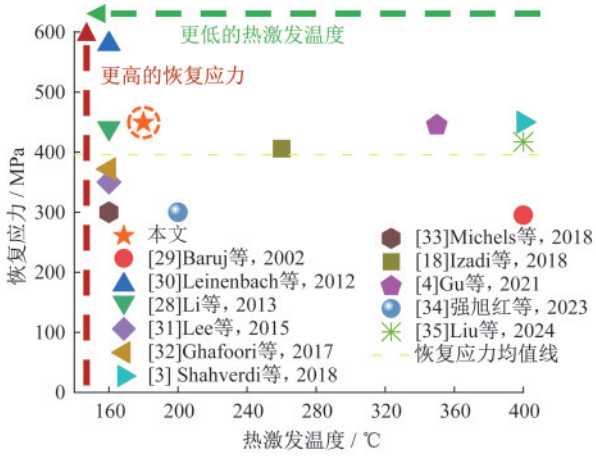


图9　SMA板的恢复应力对比
(NiTiNb-SMA与Fe-SMA相比)

Fig.9　Comparison of the recovery stress of SMA plates
(NiTiNb-SMA vs. Fe-SMA)

4　结论与展望

本文对国产镍钛基SMA板材(NiTi-SMA板和NiTiNb-SMA板)开展试验研究与对比分析，通过室温单轴拉伸试验获取弹性模量、应力平台、断裂伸长率、抗拉强度等力学性能指标；通过热激发恢复试验分析其应力恢复行为，确定最大恢复应力与对应的最佳热激发策略，并对应力恢复行为提供了初步的机理分析。此外，将NiTiNb-SMA板与

Fe-SMA板的研究数据进行比对。主要结论如下：

（1）NiTi-SMA板和NiTiNb-SMA板的弹性模量分别为普通钢材的1/7和1/3。NiTi-SMA平均抗拉强度达950 MPa但延性较低（断裂伸长率为6.5%），NiTiNb-SMA兼具高强度（921 MPa）与高延展性（断裂伸长率为39.2%）。

（2）在热激发后，相比于NiTi-SMA板，NiTiNb-SMA板可以在室温保留更多的应力，且恢复应力总体更高。

（3）NiTiNb-SMA板的最大恢复应力为448.6 MPa，对应的最优热激发策略是8%的预拉伸应变和180 ℃的热激发温度。热激发温度的提升未必带来恢复应力的增益。预拉伸应变超出应力平台以保证充分相变，同时避免过量的塑性应变累积，是产生较高恢复应力的重要前提。

（4）相比于Fe-SMA板，NiTiNb-SMA板的最大恢复应力超过国际平均水平约50 MPa。NiTiNb-SMA板能够通过适中的热激发温度产生较高的恢复应力，可适配于粘贴SMA加固系统。

本文的研究成果可在一定程度上为结构的SMA预应力加固设计与应用提供参考。

参 考 文 献

[1] 朱虹，刘子卿，董志强，等.基于铁基形状记忆合金的新型预应力技术及其工程应用[J].东南大学学报（自然科学版），2022，52(2)：402-416.
Zhu Hong, Liu Ziqing, Dong Zhiqiang, et al. New prestressing technology based on iron-based shape memory alloys and its application in engineering[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(2): 402-416.(in Chinese)

[2] Ghafoori E, Wang B, Andrawes B.Shape memory alloys for structural engineering: an editorial overview of research and future potentials [J]. Engineering Structures, 2022, 273: 115138.

[3] Shahverdi M, Michels J, Czaderski C, et al.Iron-based shape memory alloy strips for strengthening RC members: material behavior and characterization [J]. Construction and Building Materials, 2018, 173: 586-599.

[4] Gu X L, Chen Z Y, Yu Q, et al.Stress recovery behavior of an Fe-Mn-Si shape memory alloy [J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112710.

[5] 吴水根，余倩倩.Fe-SMA材料补强钢结构疲劳性能综述[J].结构工程师，2022，38(5)：182-190.
Wu Shuigen, Yu Qianqian. State-of-the-art on fatigue strengthening of steel structures by using Fe-SMA materials[J]. Structural Engineers, 2022, 38(5): 182-190.(in Chinese)

[6] 强旭红，武亚鹏，姜旭，等.铁基形状记忆合金加固钢梁和混凝土梁的加固机理与研究进展[J].结构工程师，2023，39(6)：214-228.
Qiang Xuhong, Wu Yapeng, Jiang Xu, et al. Strengthening mechanism and research progress on strengthening steel beam and RC beam with Fe-based shape memory alloys [J]. Structural Engineers, 2023, 39(6): 214-228.(in Chinese)

[7] Abdy A I, Hashemi M J, Al-Mahaidi R. Fatigue life improvement of steel structures using self-prestressing CFRP/SMA hybrid composite patches [J]. Engineering Structures, 2018, 174: 358-372.

[8] Li L, Chen T, Gu X, et al. Heat activated SMA-CFRP composites for fatigue strengthening of cracked steel plates [J]. Journal of Composites for Construction, 2020, 24(6): 04020060.

[9] Zheng B, Dawood M. Fatigue strengthening of metallic structures with a thermally activated shape memory alloy fiber-reinforced polymer patch [J]. Journal of Composites for Construction, 2017, 21(4): 04016113.

[10] Deng J, Fei Z, Wu Z, et al. Integrating SMA and CFRP for fatigue strengthening of edge-cracked steel plates [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 206: 107931.

[11] Deng J, Fei Z, Li J, et al. Flexural capacity enhancing of notched steel beams by combining shape memory alloy wires and carbon fiber-reinforced polymer sheets [J]. Advances in Structural Engineering, 2023, 26(8): 1525-1537.

[12] Qiang X, Wu Y, Jiang X, et al. Fatigue performance of cracked diaphragm cutouts in steel bridge reinforced employing CFRP/SMA [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 211: 108136.

[13] Jiang S, Liang Y, Zhang Y, et al. Influence of addition of Nb on phase transformation, microstructure and mechanical properties of equiatomic NiTi SMA [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(10): 4341-4351.

[14] Suhail R, Amato G, McCrum D. Heat-activated prestressing of NiTiNb shape memory alloy wires [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110128.

[15] Yang C, Liu T, Zhong M, et al. Enhancement of recovery stress by annealing and prestraining of NiTiNb wires [J]. Journal of Intelligent Material

Systems and Structures, 2023, 34(17): 2047-2060.

[16] 刘博,谢江胜,仲维玲,等.宽热滞 NiTiNb 形状记忆合金在混凝土结构主动约束加固中的应用研究进展[J].建筑结构,2024,54(1):111-118.
Liu Bo, Xie Jiangsheng, Zhong Weiling, et al. Applications and analysis development of wide thermal hysteresis NiTiNb shape memory alloy in active confinement reinforcement of concrete structure [J]. Building Structure, 2024, 54(1): 111-118. (in Chinese)

[17] Vůjtěch J, Ryjáček P, Campos Matos J, et al. Iron-based shape memory alloy for strengthening of 113-year bridge [J]. Engineering Structures, 2021, 248: 113231.

[18] Izadi M R, Ghafoori E, Shahverdi M, et al. Development of an iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) strengthening system for steel plates [J]. Engineering Structures, 2018, 174(July): 433-446.

[19] Izadi M, Hosseini A, Michels J, et al. Thermally activated iron-based shape memory alloy for strengthening metallic girders [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 141: 389-401.

[20] Chen Z Y, Gu X L, Zhao X L, et al. Fatigue tests on Fe-SMA strengthened steel plates considering thermal effects[J]. Journal of Structural Engineering, 2023, 149(3): 1-13.

[21] Wang W, Li L, Hosseini A, et al. Novel fatigue strengthening solution for metallic structures using adhesively bonded Fe-SMA strips: a proof of concept study[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 148: 106237.

[22] Deng J, Fei Z, Li J, et al. Fatigue behaviour of notched steel beams strengthened by a self-prestressing SMA/CFRP composite [J]. Engineering Structures, 2023, 274: 115077.

[23] Li L, Chatzi E, Czaderski C, et al. Influence of activation temperature and prestress on behavior of Fe-SMA bonded joints [J]. Construction and Building Materials, 2023, 409: 134070.

[24] Wang S, Li L, Su Q, et al. Strengthening of steel beams with adhesively bonded memory-steel strips [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 189: 110901.

[25] GB/T 228.1—2021 金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法[S].
GB/T 228.1—2021 Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature [S]. (in Chinese)

[26] YS/T 1307.1—2019 镍钛形状记忆合金记忆性能测试方法 第 1 部分:拉伸测试方法[S].
YS/T 1307.1—2019 Test method for shape memory properties of nickel-titanium shape memory alloys—Part 1: Tensile testing[S]. (in Chinese)

[27] Suhail R, Amato G, McCrum D. Heat-activated prestressing of NiTiNb shape memory alloy wires [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110128.

[28] Li K, Dong Z, Liu Y, et al. A newly developed Fe-based shape memory alloy suitable for smart civil engineering [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(4): 045002.

[29] Baruj A, Kikuchi T, Kajiwara S, et al. Effect of pre-deformation of austenite on shape memory properties in Fe-Mn-Si-based alloys containing Nb and C [J]. Materials Transactions, 2002, 43(3): 585-588.

[30] Leinenbach C, Kramer H, Bernhard C, et al. Thermo-mechanical properties of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni-VC shape memory alloy with low transformation temperature [J]. Advanced Engineering Materials, 2012, 14(1-2): 62-67.

[31] Lee W J, Weber B, Leinenbach C. Recovery stress formation in a restrained Fe-Mn-Si-based shape memory alloy used for prestressing or mechanical joining[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 600-610.

[32] Ghafoori E, Hosseini E, Leinenbach C, et al. Fatigue behavior of a Fe-Mn-Si shape memory alloy used for prestressed strengthening [J]. Materials and Design, 2017, 133: 349-362.

[33] Michels J, Shahverdi M, Czaderski C. Flexural strengthening of structural concrete with iron-based shape memory alloy strips [J]. Structural Concrete, 2018, 19(3): 876-891.

[34] 强旭红,武亚鹏,姜旭.铁基形状记忆合金力学性能和激活回复性能研究[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(5):718-727.
Qiang Xuhong, Wu Yapeng, Jiang Xu. Experimental investigation on mechanical properties and activation-recovery performance of Fe-based shape memory alloys [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(5): 718-727. (in Chinese)

[35] Liu Z, Dong Z, Hu L, et al. Mechanical and recovery behavior of a new iron-based shape memory alloy plate [J]. Structures, 2024, 61: 106049.