

# 铁基形状记忆合金力学性能和激活回复性能研究

强旭红, 武亚鹏, 姜旭

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 对研发的铁基形状记忆合金(Fe-based shape memory alloys, Fe-SMA)热轧板和冷轧板的力学性能和激活回复性能进行试验研究,得到了材料的力学性能基本参数和不同激活条件下的回复应力水平。研究发现,Fe-SMA 材料具有很高的强度和优异的延展性。Fe-SMA 热轧板的弹性模量均值为 182GPa, 抗拉强度 1 136MPa, 总延伸率 45.0%。Fe-SMA 冷轧板的弹性模量与热轧板相差不大,但冷轧板抗拉强度和总延伸率有所降低。在不同预拉伸应变与激活温度组合下, Fe-SMA 的回复应力水平为 165MPa~366MPa, 可以满足目前工程应用中针对钢板裂纹修复和梁式结构承载能力提升的加固需求。与热轧板相比, Fe-SMA 冷轧板在冷轧处理过程中形状记忆性能变差, 反复升温激活过程中累积效应降低, 因而热轧 Fe-SMA 更适用于需要多次激活补偿预应力损失的结构加固应用。Fe-SMA 的基本材性指标和激活回复应力水平可以达到国际水准, 但造价更低, 适合于土木工程领域的加固应用。

**关键词:** 铁基形状记忆合金; 力学性能; 加热激活; 回复应力; 热轧; 冷轧

中图分类号: TU392

文献标志码: A

## Experimental Investigation on Mechanical Properties and Activation-recovery Performance of Fe-based Shape Memory Alloys

QIANG Xuhong, WU Yapeng, JIANG Xu

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** An experimental study on the mechanical properties and activation-recovery performance of hot-rolled and cold-rolled Fe-based shape memory alloys (Fe-SMA) plate was carried out and presented herein. The basic mechanical parameters and recovery stress level

under different activation conditions were obtained. The results indicate that the developed Fe-SMA exhibits strong strength and excellent ductility. The average elastic modulus of hot-rolled Fe-SMA plate is 182GPa, and its tensile strength is 1136MPa, while its total elongation is 45.0%. The elasticity modulus of cold-rolled Fe-SMA plate is basically equal with that of hot-rolled plate, but its tensile strength and total elongation are relatively low. The recovery stress level of Fe-SMA obtained under different combinations of pre-tension strain and activation temperature is 165MPa~366MPa, which can meet the requirements of engineering application for crack repair of steel plates and capacity improvement of beam structures. The shape memory performance of cold-rolled Fe-SMA plate deteriorates during cold rolling process, and the cumulative effect during repeated heating activation is reduced. Compared with cold-rolled Fe-SMA, hot-rolled Fe-SMA is more suitable for structural reinforcement applications that require multiple activations to compensate for prestress loss. On the comprehensive level, the basic material properties and activation-recovery stress of Fe-SMA studied in this paper can keep pace with international product levels of Fe-SMA. However, the Fe-SMA studied in this paper is more suitable for the rehabilitation application of engineering structures due to its low cost in comparison to the international products.

**Key words:** Fe-based shape memory alloys; mechanical property; heating activation; recovery stress; hot rolling; cold rolling

土木工程结构(如桥梁、建筑和桅塔等)在设计、建造、施工过程中可能存在各种缺陷,长期服役状态

收稿日期: 2021-12-12

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2020YFD1100400, 2017YFB0304701); 国家自然科学基金(52278206, 52278207)

第一作者: 强旭红(1984—), 女, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构加固、钢结构抗火及高性能材料在土木工程领域的应用。E-mail: qiangxuhong@tongji.edu.cn

通信作者: 姜旭(1982—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为钢结构和钢与组合结构及高性能材料在土木工程领域的应用。E-mail: jiangxu@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

下因超载、腐蚀、疲劳等原因会导致结构开裂和老化,并且随时间不断累积,导致结构发生破坏。因此,需要进行加固修复来提升结构的承载能力和延长使用寿命。

利用形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)的形状记忆特性,在不使用千斤顶等复杂设备的情况下对结构进行预应力加固一直被各国学者关注和研究。使用SMA对被加固结构施加预应力时,SMA在整个构件长度上产生均匀的压缩,施加预应力阶段不会发生摩擦损失<sup>[1]</sup>,而且蠕变等长期作用下引起的预应力损失可通过重新激活SMA来补偿<sup>[2]</sup>。

在土木工程领域应用比较广泛的SMA有镍钛基形状记忆合金(NiTi-SMA)和铁基形状记忆合金(Fe-SMA)两类。Fe-SMA的形状恢复能力(约为1%)相对NiTi-SMA较弱,但在强度、塑性、成形加工等方面性能优越,更重要的是其生产成本远低于NiTi-SMA,因而更适合在土木工程结构加固领域的广泛应用<sup>[3-4]</sup>。Soroushian等人最早使用Fe-SMA(Fe-28Mn-6Si-5Cr)对美国密西根州一座桥梁的剪切裂缝进行了外部加固<sup>[5]</sup>,提高了结

构的抗剪承载性能。近年来瑞士的Empa研究所对其研发的Fe-SMA(Fe-17Mn-5Si-10Cr-4Ni-1(V,C))进行了力学性能、激活回复性能、结构加固应用等系列研究,证明了Fe-SMA加固结构的可行性和高效性<sup>[6-8]</sup>。

在我国应用Fe-SMA对结构进行加固修复具有巨大潜力,但进口Fe-SMA价格极高,且相关研究和应用存在很大不足。因此,本文对国产Fe-SMA的力学性能和激活回复特性进行了试验研究,期望降低造价的同时指导国产Fe-SMA用于土木工程结构加固的优化设计与应用。

## 1 Fe-SMA材料

### 1.1 材料特性

SMA含有奥氏体和马氏体两个不同晶体结构的相态,在温度和应力作用下奥氏体和马氏体之间的相态转变称为马氏体相变,相变过程中材料原子间发生无扩散的固态位移转变,具有可恢复性(见图1a),不同于普通钢材受力时原子间因滑移和重新排列而发生的塑性变形(见图1b)<sup>[9]</sup>。

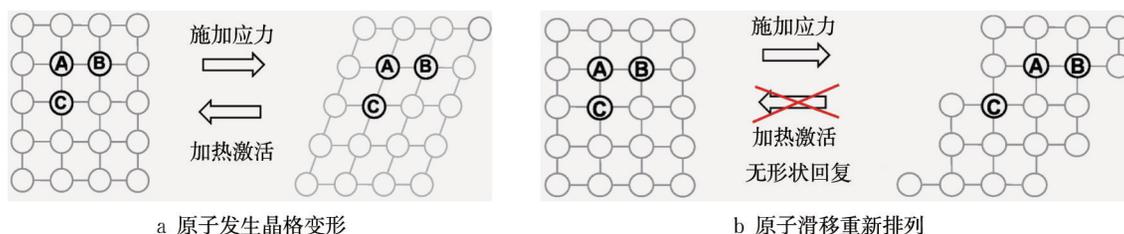


图1 SMA发生变形时不同的原子行为<sup>[9]</sup>

Fig.1 Different atomic behavior when SMA deforms<sup>[9]</sup>

SMA在马氏体相变过程中存在四个特征温度,分别为马氏体相变开始温度 $M_s$ 、马氏体相变结束温度 $M_f$ 、奥氏体相变开始温度 $A_s$ 和奥氏体相变结束温度 $A_f$ ,温度和相变过程的对应关系如图2所示。Fe-SMA的形状记忆效应如图3所示:常温下( $T < A_s$ )对材料施加荷载会使Fe-SMA发生宏观变形,宏观变形包括弹性变形、伪弹性变形、可恢复变形和塑性变形4部分(路径①);移除外加荷载后弹性变形和伪弹性变形可恢复(路径②);此时对材料进行升温,当温度超过 $A_s$ 后将发生马氏体逆向相变,可恢复变形会随着马氏体逆向相变逐渐消失,温度超过 $A_f$ 后残余变形只剩下塑性变形部分(路径③);升温完成后的降温阶段若没有外力作用将不会发生新的变形(路径④)。

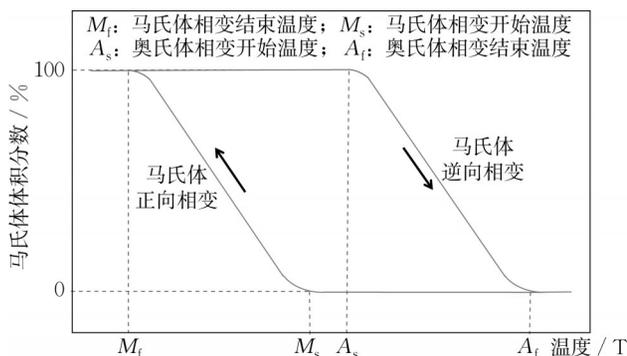


图2 SMA相变特征温度

Fig.2 Phase transition temperature

### 1.2 材料生产工艺

根据目前土木工程领域对结构加固所需材料的要求,本文研发Fe-SMA的合金元素成分和比例为

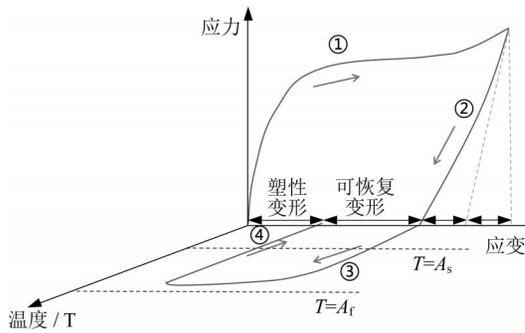


图3 SMA的形状记忆效应

Fig.3 Shape memory effect of SMA

Fe-15Mn-4.5Si-10Cr-5Ni-0.1C-0.03Nb。Fe-SMA用普通纯Fe、金属Mn、金属Si、金属Cr、电解Ni、C以及Nb为原料,使用真空感应炉进行冶炼,在氩气保护下浇筑成钢锭。铸锭进行1250℃均匀化退火15h,空冷至室温。热锻得到厚度50mm的Fe-SMA锭块,再进行热轧,得到厚度为5mm的Fe-SMA热轧板。应用Fe-SMA对结构进行损伤修复或承载能力提升时所需材料用量较大,也需要用到厚度较薄的Fe-SMA。因此,为满足工程应用需求同时降低材料造价,对Fe-SMA热轧板进行冷轧(最大下压量40%),得到厚度1.8mm的Fe-SMA冷轧板。

Fe-SMA热轧板的金相组织如图4a所示,奥氏体晶粒沿轧制方向被压扁拉长,系统处于不稳定的高能状态。因此,Fe-SMA热轧板和冷轧板在轧制完成后需要进行800℃时效热处理(800℃时效热处理:将合金在800℃温度下进行持续1h的高温处理,之后水冷至室温),经过800℃时效处理后奥氏体晶粒发生了再结晶,系统由高能状态转变为较稳定的低能状态(见图4b)。

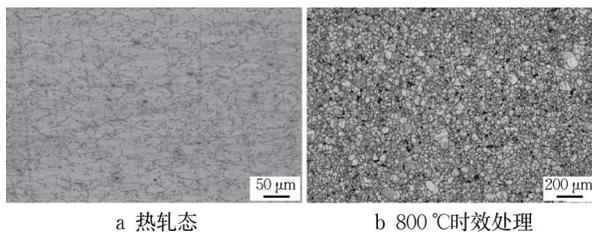


图4 Fe-SMA金相组织

Fig.4 Metallographic structure of Fe-SMA

## 2 力学性能试验

### 2.1 材性试件

为得到Fe-SMA的力学性能参数(弹性模量、屈

服应力、抗拉强度、延伸率等),根据《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》(GB/T228.1-2010)<sup>[10]</sup>设计了Fe-SMA材性试件(如图5所示)进行静力拉伸试验。根据轧制工艺不同,分别设计了热轧板和冷轧板两组,热轧板编号为RZ-1—RZ-6,Fe-SMA冷轧板编号为LZ-1—LZ-6。板材拉伸试件按照《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975-2018)<sup>[11]</sup>进行全截面取样。

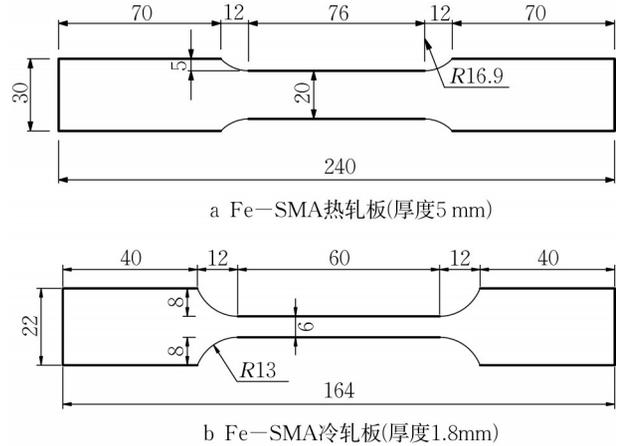


图5 Fe-SMA材性试件尺寸

Fig.5 Geometry of test specimens

### 2.2 试验方法

试验加载在同济大学土木工程防灾国家重点实验室电子拉伸试验机上进行,按照《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》<sup>[10]</sup>,采用两阶段加载控制。第1阶段采用应变速率 $3.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 控制加载;应变达到0.05后,采用位移速率 $2.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 加载至试件断裂。第1阶段加载主要用于测量Fe-SMA的初始弹性模量和名义屈服强度,第2阶段主要用于测量Fe-SMA材料的抗拉极限强度和延伸率。

### 2.3 试验结果

#### 2.3.1 Fe-SMA热轧板

Fe-SMA热轧板静力拉伸的工程应力-应变曲线如图6所示,力学性能参数列于表1。Fe-SMA为没有明显的屈服平台的弹塑性材料,因此用其规定塑性延伸强度 $R_{p0.01}$ 和 $R_{p0.2}$ (塑性延伸率为0.01%和0.2%对应的应力)来表征材料的屈服强度,进而分析材料的力学性能。

取应力-应变曲线初始阶段的切线模量为弹性模量,试验得到Fe-SMA热轧板的弹性模量在170GPa~200GPa之间,平均值为182GPa,与普通钢材较为接近。Fe-SMA热轧板的 $R_{p0.01}$ 和 $R_{p0.2}$ 均值分别为565MPa和734MPa,抗拉强度均值高达

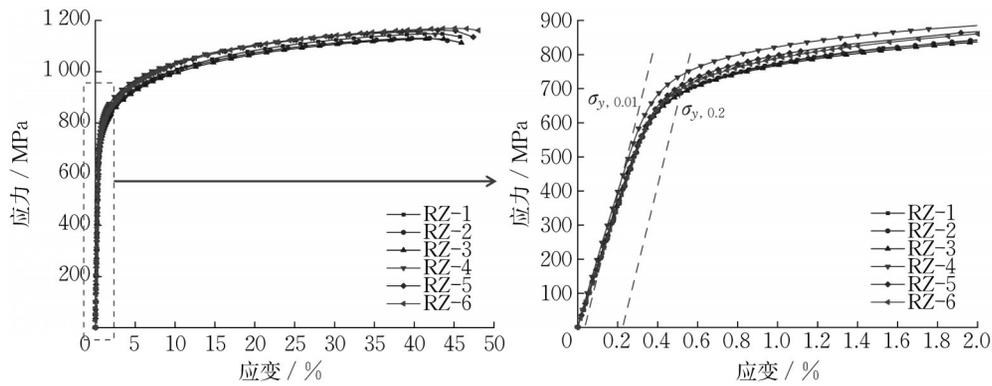


图 6 Fe-SMA 热轧板工程应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of hot-rolled Fe-SMA plate

1 136MPa,总延伸率均值为 45.0%,表现出了很强

表 1 Fe-SMA 热轧板的材性参数

Tab.1 Mechanical properties of hot-rolled Fe-SMA plate

编号	弹性模量/GPa	$R_{p0.01}/MPa$	$R_{p0.2}/MPa$	抗拉强度/MPa	总延伸率/%
RZ-1	176	583	712	1 136	45.5
RZ-2	175	572	772	1 121	44.0
RZ-3	181	556	705	1 113	46.0
RZ-4	202	532	756	1 145	42.5
RZ-5	181	570	735	1 135	44.0
RZ-6	178	577	725	1 161	48.0
平均值	182	565	734	1 136	45.0

2.3.2 Fe-SMA 冷轧板

Fe-SMA 冷轧板的工程应力-应变曲线如图 7 所示,力学性能参数列于表 2。冷轧板弹性模量均值为 166GPa,与热轧板相差不大;抗拉强度和总延伸率分

的承载能力和优异的延展性。

别为 894MPa 和 35.5%,与热轧板相比分别下降了 21.31% 和 21.12%; $R_{p0.01}$  和  $R_{p0.2}$  均值分别为 350MPa 和 490MPa,相比热轧板也有所降低;但是冷轧板的名义屈服强度和延展性仍然高于普通钢材。

表 2 Fe-SMA 冷轧板的材性参数

Tab.2 Mechanical properties of cold-rolled Fe-SMA plate

编号	弹性模量/GPa	$R_{p0.01}/MPa$	$R_{p0.2}/MPa$	抗拉强度/MPa	总延伸率/%
LZ-1	168	304	482	896	33.0
LZ-2	166	313	490	918	41.0
LZ-3	166	361	479	905	40.5
LZ-4	165	388	498	871	31.0
LZ-5	161	395	504	906	32.5
LZ-6	171	340	487	865	35.5
平均值	166	350	490	894	35.5

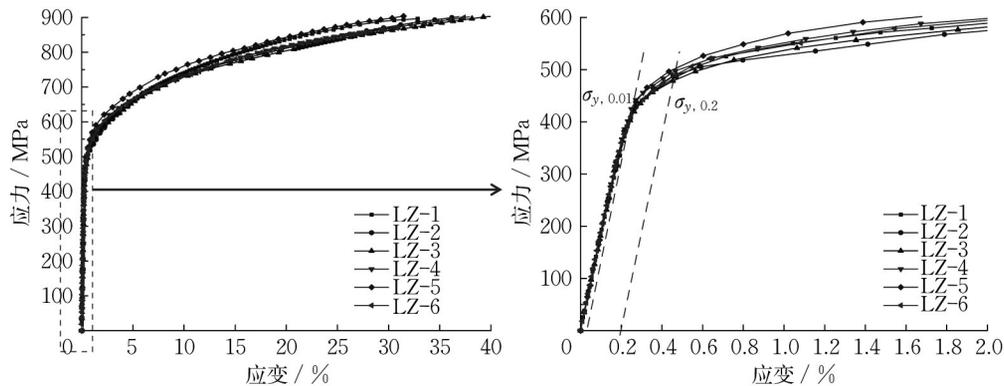


图 7 Fe-SMA 冷轧板的工程应力-应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of cold-rolled Fe-SMA plate

2.4 对比分析

将国外学者的 Fe-SMA 力学性能试验结果汇总于表 3,并与本文研究的 Fe-SMA 进行对比。可

以看出,不同元素组分 Fe-SMA 的弹性模量差别较大,分布在 120GPa~200GPa 范围。抗拉强度均超过 800MPa,名义屈服强度在 400MPa~750MPa 之

表 3 Fe-SMA 力学性能对比

Tab.3 Comparison on mechanical properties of Fe-SMA

材料	元素成分	弹性模量/GPa	$R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度/MPa	总延伸率/%	
文献[9]		194	476	950	45.0	
文献[12]	Fe-17Mn-5Si-10Cr-4Ni-1(V,C)	173	546	1 015	54.9	
文献[13]		160	535	大约 1 000	47.0	
文献[14]	Fe-Mn-Si 系	133	463	863	12.4	
文献[15]	Fe-17Mn-5Si-5Cr-0.3C-1T	125	599	1 140	22.5	
	Fe-17Mn-5Si-5Cr-4Ni-0.1C	123	410	1 080	39.5	
本文	Fe-15Mn-4.5Si-10Cr-5Ni-0.1C-0.03Nb	热轧	182	734	1 136	45.0
		冷轧	166	490	894	35.5

间,具有良好的承载能力。总体上,根据弹性模量、屈服强度、抗拉强度和总延伸率等基本材性指标来看,本文所研究的 Fe-SMA 可以比肩甚至超过国际水准。

### 3 激活回复性能

根据前文对 Fe-SMA 形状记忆效应的介绍,材料被拉伸后卸载将产生残余变形,拉伸过程中由马

氏体相变引发的可恢复变形经升温加热可以得到恢复(见图 3,路径③)。如果在加热激活过程中对 Fe-SMA 构件两端施加约束,限制其自由变形,则可在 Fe-SMA 构件中产生回复应力(见图 8),此即为 Fe-SMA 的激活回复性能。

之后,Fe-SMA 将以激活后的回复应力为基础,在服役应力状态下继续工作(见图 8b 中虚线)。

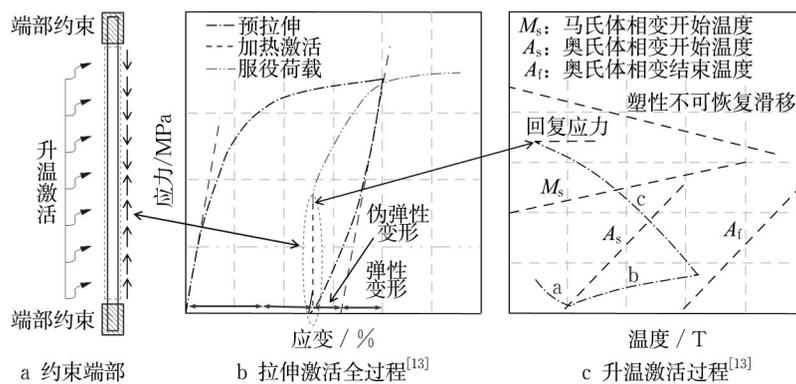


图 8 Fe-SMA 激活回复过程

Fig.8 Activate process of Fe-SMA

以梁式结构加固为例,激活 Fe-SMA 对结构进行预应力加固的过程如图 9 所示。

将预拉伸后的 Fe-SMA 构件连接到被加固结构上,激活 Fe-SMA 使其发生马氏体逆相变,从而引入预应力,加固后的放大效果为使梁出现反拱效应,提高结构在正常使用阶段的刚度和极限承载能力。应用 Fe-SMA 修复构件的局部裂纹时,可以增加开裂部位的刚度以减小应力响应,同时通过激活 Fe-SMA 引入预应力来减小平均应力。

本节对 Fe-SMA 的激活回复特性进行研究,明确其在不同预拉伸应变与激活温度组合作用下所能达到的回复应力水平。

#### 3.1 试件准备

设计图 10 所示的 Fe-SMA 试件进行激活回复性能测试。由于试件需要放到高温炉中进行升温加热,高温炉高度为 220mm,因此试件总长设计为 400mm,放置于高温炉内后剩余夹持端长度为 90mm。根据轧制方式不同,对 Fe-SMA 热轧板冷轧板分别进行测试。

#### 3.2 加载方案

试验装置如图 11 所示,采用高温拉伸试验机对 Fe-SMA 试件进行加载,其最大加载力为 300kN。加热炉采用 MTS653.04 型高温炉,最高加热温度为 1 400℃。加热炉分上、中、下 3 段加热,高温炉配备

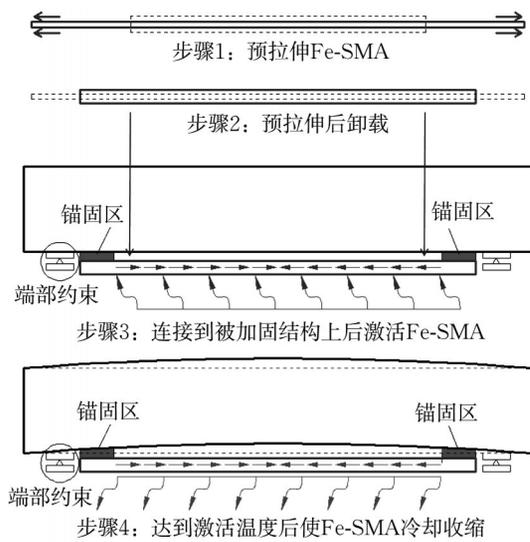


图9 Fe-SMA加固过程

Fig.9 Reinforcement process of Fe-SMA

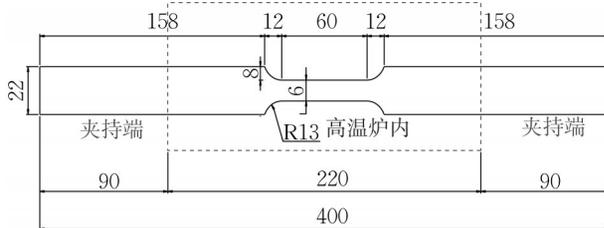


图10 激活测试试件尺寸(单位:mm)

Fig.10 Activation test specimens size (Unit: mm)

一个热电偶用于调控炉温。同时在Fe-SMA试件测试段部位布置3个外加热电偶,用以测量试件表面的真实温度。试件的变形采用高温陶瓷引伸计测量,精度为0.001mm。

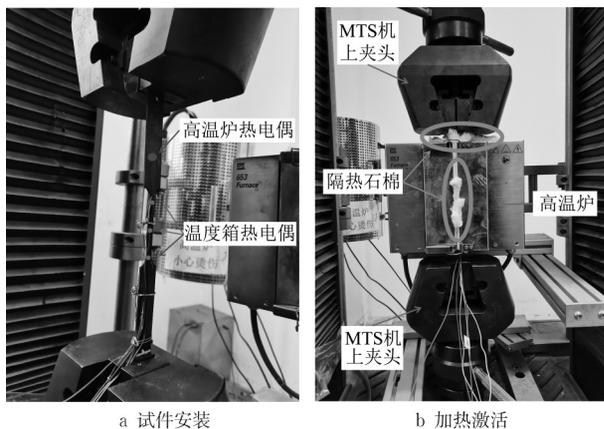


图11 激活回复试验设备

Fig.11 Activation test device

按照《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法》<sup>[10]</sup>,预拉伸阶段采用应变速率 $3.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 控制

加载,达到指定预拉伸应变后卸载至应力为0。为了防止试件在加热激活过程中出现受压屈曲,对试件施加50MPa的初始拉伸应力,之后保持应变恒定,对Fe-SMA试件进行升温激活。对于Fe-SMA冷轧板,由于其厚度较薄,拉伸至6%预应变后卸载至应力为100MPa,继而保持应变恒定进行升温激活。

### 3.3 试验结果

#### 3.3.1 Fe-SMA热轧板

加热激活设置6个温度梯度,分别为150℃、200℃、250℃、300℃、350℃和400℃。预拉应变设置5个梯度,分别为2%、3%、4%、6%、8%。本文采取“预拉伸卸载—梯度升温—回复应力”和“预拉伸卸载—单次升温—回复应力”两种加热激活模式。梯度升温为保持应变恒定下进行20℃(室温)→150℃→20℃→200℃→20℃→250℃→20℃→300℃→20℃→350℃→20℃→400℃→20℃的梯度升温过程,单次升温为保持应变恒定下进行150℃、200℃、250℃、300℃、350℃和400℃单次加热激活。

Fe-SMA热轧板的激活回复试验结果列于表4。可以看出,在不同的预拉伸应变下梯度升温 and 单次升温两种加热模式下所得回复应力结果十分接近,实际工程应用中疲劳、蠕变等长期作用引起的预应力损失可以通过重新激活SMA进行补偿。

不同预拉伸应变与激活温度作用下最大回复应力组合列于表5。根据测试结果,2%预拉伸应变与150℃激活条件下回复应力为165MPa,4%预拉伸应变与200℃条件下回复应力为213MPa,4%预拉伸应变与300℃条件下回复应力可以达到314MPa。本文所研发Fe-SMA的回复应力可以达到普通钢结构(如Q235和Q355等)的工作应力水平,满足目前工程应用中针对钢板裂纹修复和梁式结构承载能力提升的需求。

不同激活温度下回复应力水平的对比如图12所示。随着温度的升高,各预拉伸应变下回复应力的升高趋势保持一致。在150℃~300℃升温过程中,回复应力随温度升高基本保持线性增长趋势。由300℃向400℃升温的过程中回复应力继续增加,但是增长趋势放缓。

不同预拉伸应变下回复应力水平的对比如图13所示。在150℃~400℃的升温过程中,等温线的间距变化趋势也表明了图12所示的回复应力升高趋势。总体上,预拉伸应变在2%~4%范围内时,加热激活温度在150℃~300℃范围就可以得到更好的激活回

表 4 Fe-SMA 热轧板激活回复应力表

Tab.4 Activation-recovery stress of hot-rolled Fe-SMA plate

		回复应力表/MPa						
激活温度/°C		150	200	250	300	350	400	加热模式
预拉伸应变	2%	165	214	254	297	325	335	梯度升温
		165	215	260	285	312	337	单次升温
	3%	135	208	255	305	329	350	梯度升温
		137	201	255	299	340	356	单次升温
	4%	150	213	263	316	338	352	梯度升温
		147	217	260	314	346	355	单次升温
	6%	130	181	234	306	330	363	梯度升温
		133	186	254	304	340	361	单次升温
	8%	140	184	237	278	345	368	梯度升温
		138	185	258	287	351	366	单次升温

表 5 回复应力最佳组合

Tab.5 The optimized combination of recovery stress

激活温度/°C	150	200	250	300	350	400	备注
预拉伸应变/%	2	4	4	4	6	8	应变
回复应力/MPa	165	213	263	316	345	368	梯度升温
	165	217	260	314	351	366	单次升温

复效果(效果好于 300°C 以上的激发温度);而预拉伸

应变为 6% 和 8% 时,需要较高的激活温度(350°C、400°C)才能得到更好的激活回复效果。因此,Fe-SMA 热轧板在工程应用时预拉伸应变只需控制在 2%~4% 范围内,更高的预拉伸应变需要的激活温度过高,实现难度高的同时也超过了结构的安全允许温度,可能造成结构二次损伤。

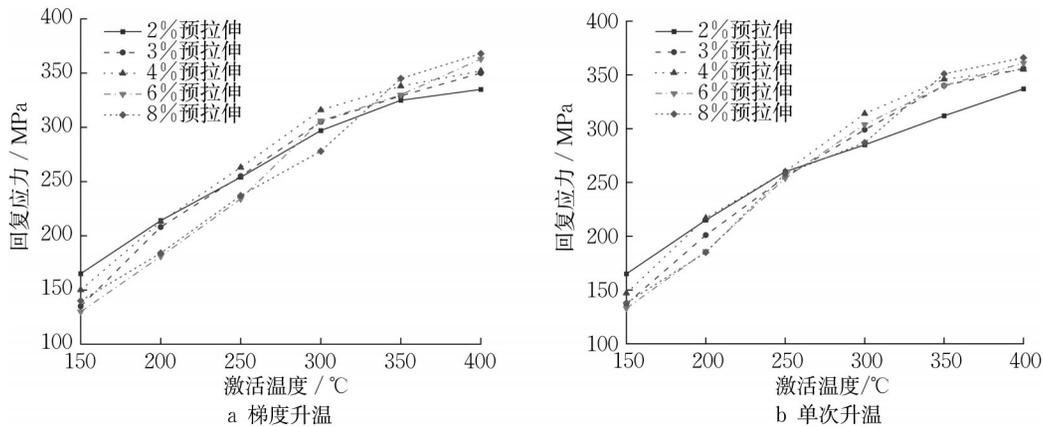


图 12 不同激活温度对比

Fig.12 Comparison of different activation temperatures

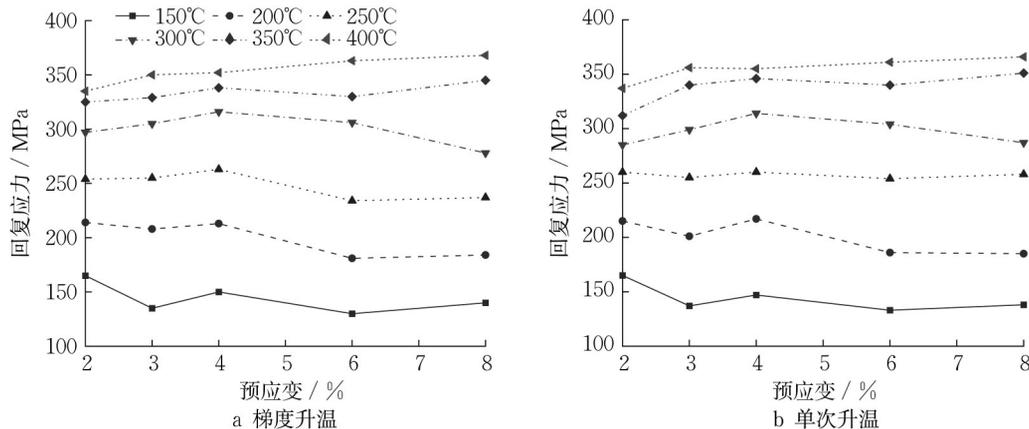


图 13 不同预拉伸应变对比

Fig.13 Comparison of different pre-tension strains

3.3.2 Fe-SMA冷轧板

设计了4个Fe-SMA冷轧板的加热激活试件,编号为JH-1—JH-4。冷轧激活试件的预拉伸应变统一设定为6%,试件JH-1和JH-2进行20°C(室温)→150°C→20°C→200°C→20°C→250°C→20°C→300°C

→20°C→400°C→20°C的梯度升温激活,试件JH-3和JH-4进行200°C单次升温激活。

在6%预拉伸应变下,冷轧板梯度升温模式所得回复应力结果列于表6,Fe-SMA热轧板和冷轧板激活回复应力对比如图14所示。

表6 Fe-SMA冷轧板激活回复应力

Tab.6 Activation-recovery stress of cold-rolled Fe-SMA plate

预拉伸		6%				
激活温度/°C		150	200	250	300	400
回复应力/MPa	试件JH-1	200	240	260	270	275
	试件JH-2	173	204	226	250	268

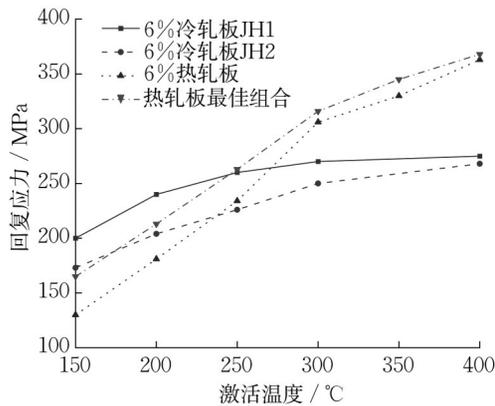


图14 热轧板和冷轧板回复应力对比

Fig.14 Recovery stress comparison of hot-rolled and cold-rolled plate

从增长趋势上看,Fe-SMA冷轧板在150°C到300°C梯度升温过程中回复应力增长速度相对热轧板较慢,而激活温度由300°C升高到400°C的过程中

回复应力增加十分微小,没有表现出类似于热轧板的可循环性能。试件JH-1、JH-2在6%预拉伸应变与200°C梯度激活条件下所得回复应力分别为240MPa和204MPa,试件JH-3、JH-4在6%预拉伸应变与200°C单次激活条件下所得的回复应力分别为270MPa和300MPa,单次升温模式的回复应力大于梯度升温模式。

出现上述差异的原因是冷轧板在热轧板的基础上经过冷轧加工工艺得到,在冷轧过程中Fe-SMA的晶体结构会受到影响,虽然经过800°C时效处理后又由马氏体相转变回奥氏体相,但是Fe-SMA材料的形状记忆性能变差,因而反复升温激活过程累积效应降低。

如图15所示,以试件JH4为例来分析Fe-SMA加热激活过程中的应变-应力和温度-应力的关系。

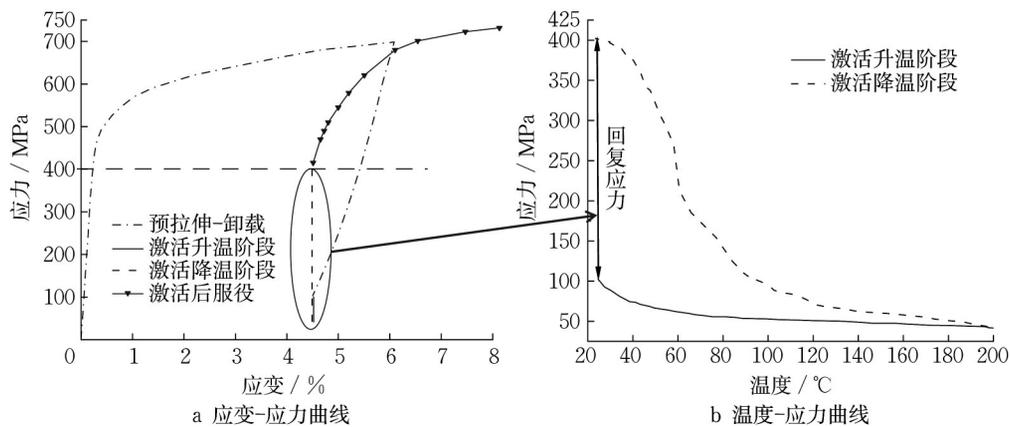


图15 试件JH-4激活回复曲线

Fig.15 Activation-recovery curves of specimen JH-4

从加载曲线可以看出,试件没有发生受压屈曲,但是激活过程中温度-应力曲线的变化规律与参考文献[13](见图8c)差别较大。这是由于试件的宽度

较窄,同时本身厚度较薄,所以在升温激活过程中马氏体逆相变引发的材料收缩效应一直低于材料在受热状态下的膨胀作用。因而应力在激活升温阶段一

直减小,直到200℃时应力保持在42MPa。之后的降温阶段,在温度低于100℃后,回复应力才随温度降低快速增长。

表7 Fe-SMA激活回复性能对比

Tab.7 Activation-recovery property comparison of Fe-SMA

材料	合金成分	激活条件	试验方式	预应力/MPa
文献[16]	Fe-17Mn-5Si-10Cr-4Ni-1(V,C)	2%预拉伸+160℃	Fe-SMA板;电流加热; 长250mm,宽15mm;	250~300
文献[17]		2%预拉伸+260℃	Fe-SMA板;电流加热	406
文献[5]	Fe-28Mn-6Si-5Cr	3%预拉伸+300℃	Fe-SMA筋;电流加热; 长125mm,直径10.4mm;	255
	Fe-18Mn-8Cr-4Si-2Ni-0.36Nb-0.36N			185
文献[18]	未明确	6%预拉伸+350℃	Fe-SMA筋;直径14.3mm; 柔性加热带加热	160/215
文献[19]	未明确	大约3%预拉伸 +155℃	Fe-SMA筋;直径15.8mm; 实际工程加固;电流加热	268~295
本文	Fe-15Mn-4.5Si-10Cr-5Ni-0.1C-0.03Nb	热轧	Fe-SMA板; 长220mm,宽6~22mm; 高温炉加热	214
		冷轧		299
				270/300

### 3.4 对比分析

将国外学者对Fe-SMA的研究结果汇总于表7,并与本文结果进行对比。可以看出,目前Fe-SMA所具备的激活回复能力差别较大,最高可以在2%预拉伸应变与260℃激活条件下得到406MPa回复应力,较差的在6%预拉伸应变与350℃激活条件下得到160MPa回复应力。本文所研发Fe-SMA的激活回复应力相对低于文献[16]和文献[17],但是也表现出了足够好的激活回复能力,在2%预拉伸应变与200℃条件下,可以达到214MPa的激活回复应力,可以满足工程加固应用需求。

## 4 结论

本文研发Fe-SMA的元素成分为Fe-15Mn-4.5Si-10Cr-5Ni-0.1C-0.03Nb,对Fe-SMA锭块进行热轧得到厚度5mm的Fe-SMA热轧板,为满足土木工程加固应用需求同时降低加工成本,对Fe-SMA热轧板进一步冷轧得到厚度1.8mm的Fe-SMA冷轧板。本文对Fe-SMA热轧板和冷轧板的力学性能分别进行试验研究,得到了两种不同处理工艺下材料的弹性模量、名义屈服强度、抗拉强度、总延伸率等关键力学性能指标,通过激活试验得到了不同“预拉伸应变与激活温度”条件下的回复应力对应表;并在此基础上将本文所研发Fe-SMA的力学性能参数和回复应力水平与国外学者对Fe-SMA的研究成果进行了对比,主要结论如下:

(1)Fe-SMA热轧板的弹性模量在170GPa~

200GPa范围,抗拉强度均值高达1136MPa,总延伸率为45.0%,表现出较高的强度和优异的延展性。冷轧板弹性模量与热轧板相差不大,抗拉强度和总延伸率均值分别为894MPa和35.5%,与热轧板相比分别降低了21.31%和21.12%。

(2)Fe-SMA在2%预拉伸应变与150℃激活条件下的回复应力为165MPa,在4%预拉伸应变与200℃激活条件下的回复应力为213MPa,4%预拉伸应变与300℃激活条件下的回复应力可以达到314MPa,能够满足目前工程结构加固应用中针对钢板裂纹修复和梁式结构承载能力提升的需求。

(3)Fe-SMA冷轧板是在热轧板的基础上经过进一步冷轧制造的,在轧制过程中组织结构受到影响,因而冷轧板的形状记忆性能变差,反复升温激活过程中累积效应降低,梯度升温模式下回复应力增长不明显。因此,对于需要多次激活补偿预应力损失的结构加固应用,适合采用热轧Fe-SMA板。

(4)本文所研发Fe-SMA的弹性模量、屈服强度、抗拉强度和总延伸率等基本力学性能指标可以达到国际水平,同时表现出良好的激活回复能力,满足目前工程加固应用需求。而且本文的国产Fe-SMA相比进口造价更低,更加适用于在土木工程结构加固领域的推广与应用。

### 作者贡献声明:

强旭红:课题负责人,提出了研究方案,设计了论文的框架,撰写论文终稿;

武亚鹏:试验实施,试验数据处理,试验结果分析和解释,撰写论文初稿;

姜旭:制定研究方案,指导试验结果的分析 and 解释,提出论文修改意见和建议。

### 参考文献:

- [1] SHIN M, ANDRAWES B. Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys [J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(3): 656.
- [2] IZADI M R, GHAFORI E, MOTAVALLI M, *et al.* Iron-based shape memory alloy for the fatigue strengthening of cracked steel plates: Effects of re-activations and loading frequencies[J]. *Engineering Structures*, 2018, 176: 953.
- [3] QIANG X H, WU Y P, WANG Y H, *et al.* Research progress and applications of Fe-Mn-Si-Based shape memory alloys on reinforcing steel and concrete bridges [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(6): 3404.
- [4] 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 & Building Materials*, 2015, 95(10): 600.
- [5] SOROUSIAN P, OSTOWARI K, NOSSONI A, *et al.* Repair and strengthening of concrete structures through application of corrective posttensioning forces with shape memory alloys [J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2001, 1770: 20.
- [6] KOSTER M, LEE W J, SCHWARZENBERGER M, *et al.* Cyclic deformation and structural fatigue behavior of an Fe-Mn-Si shape memory alloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2015, 637(6): 29.
- [7] IZADI M R, MOTAVALLI M, GHAFORI E. Iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) for fatigue strengthening of cracked steel bridge connections [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116800.
- [8] SHAHVERDI M, CZADERSKI C, ANNEN P, *et al.* Strengthening of RC beams by iron-based shape memory alloy bars embedded in a shotcrete layer [J]. *Engineering Structures*, 2016, 117: 263.
- [9] MONTOYA C L A, RUIZ P J G, RIBAS C, *et al.* Experimental study on shear strengthening of shear critical RC beams using iron-based shape memory alloy strips [J]. *Engineering Structures*, 2019, 200(12): 109680.
- [10] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法 GB/T228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备 GB/T 2975-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [12] GHAFORI E, HOSSEINI E, LEINENBACH C. Fatigue behavior of a Fe-Mn-Si shape memory alloy used for prestressed strengthening [J]. *Materials and Design*, 2017, 133: 349.
- [13] SHAHVERDI M, MICHELS J, CZADERSKI C, *et al.* Iron-based shape memory alloy strips for strengthening RC members: Material behavior and characterization [J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 173(6): 586.
- [14] HONG K, SUGYU L, YEONGMO Y, *et al.* Flexural response of reinforced concrete beams strengthened with near-surface-mounted Fe-Based shape-memory alloy strips [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2018, 12(1): 45.
- [15] HONG K N, YEON Y M, SHIM W B, *et al.* Recovery Behavior of Fe-Based Shape Memory Alloys Under Different Restraints [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10): 3441.
- [16] JULIEN M, MOSLEM S, CZADERSKI C. Flexural strengthening of structural concrete with iron-based shape memory alloy strips [J]. *Structural Concrete Journal of the Fib*, 2018, 19: 876.
- [17] IZADI M R, GHAFORI 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: 433.
- [18] ROJOB H, EL-HACHA R. Fatigue performance of RC beams strengthened with self-prestressed iron-based shape memory alloys [J]. *Engineering Structures*, 2018, 168(8): 35.
- [19] EL-HACHA R, ROJOB H. Flexural strengthening of large-scale reinforced concrete beams using near-surface-mounted self-prestressed iron-based shape-memory alloy strips [J]. *PCI Journal*, 2018, 63(6): 55.