

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202111009

# Fe-SMA 的材料特性及在土木工程中的应用进展\*

张哲熹<sup>1,2</sup>, 方成<sup>1,2</sup>, 王伟<sup>1,2</sup>, 陈以一<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:** 铁基形状记忆合金(Fe-SMA)拥有可靠的形状记忆效应及优异的抗低周疲劳性能,在土木工程领域具有较为广阔的应用前景。材料特性方面,重点介绍Fe-SMA形状记忆效应及应力作用下亚结构层面相变机理,在此基础上阐述单调及循环加载下Fe-SMA的力学性能;工程应用方面,对Fe-SMA的主要应用范围及相应关键技术进行总结,详细回顾Fe-SMA构件的构造形式、工作机理和力学性能,对不同技术实施方案的特点、优势和潜在不足进行评述。指出需进一步明确Fe-SMA阻尼构件的耗能破坏模式、变形相容条件和恢复力机制,建立损伤可控的Fe-SMA耗能元组件结构体系设计方法。

**关键词:** 铁基形状记忆合金; 形状记忆效应; 马氏体相变; 预应力加固; 低周疲劳; 阻尼器

**中图分类号:** TB381; TU511.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0411-14

## Material Properties of Fe-SMA and Its Application in Civil Engineering

ZHANG Zhexi<sup>1,2</sup>, FANG Cheng<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, CHEN Yiyi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Iron-based shape memory alloys (SMAs) are materials that have shape-memory effect as well as outstanding low-cycle fatigue resistance, leading to a broad application prospect in civil engineering. This paper presents the fundamentals of the martensitic transformation of Fe-SMA and some key properties, such as corrosion resistance, weldability and mechanical properties under monotonic or cyclic loading. This is followed by a description of their practical applications like structural reinforcement and seismic dampers. In terms of engineering application, the main application scope and corresponding key technologies of Fe-SMA are summarized, and the structural form, working mechanism and mechanical properties of Fe-SMA components are especially reviewed. The characteristics, advantages and potential disadvantages of different technical implementation schemes are commented. It is mentioned that the energy dissipation failure mode, deformation compatibility and restoring force mechanism of Fe-SMA damping members need to be further clarified, and complete design principle of damage-controllable Fe-SMA-based structure system needs to be established.

\* 收稿日期:2021-09-02;修回日期:2021-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51778456, 52078359)资助

作者简介:张哲熹(1997—),男,博士研究生。主要从事形状记忆合金-抗震韧性结构方面的研究。

E-mail:zxx888@tongji.edu.cn

通讯作者:方成(1985—),男,副教授,博导,博士。主要从事抗震韧性结构方面的研究。E-mail:chengfang@tongji.edu.cn

**Keywords:** iron-based shape memory alloy (Fe-SMA); shape memory effect; martensitic transformation; prestressed strengthening; low cycle fatigue; seismic damping alloy

## 引言

自1982年首次发现Fe-Mn-Si族合金(俗称铁基形状记忆合金, Fe-SMA)的形状记忆效应以来, Fe-SMA以其稳定的力学性能和相对低廉的价格在机械工业领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。Fe-SMA的形状记忆效应源自于一种无原子扩散型的可逆马氏体相变,通过升温促使变形恢复。利用这一独特的形状记忆行为,近10年来Fe-SMA在土木工程加固与修复领域的关注度迅速提升。加固原理为采用电流或者红外线热辐射将预变形的Fe-SMA板材/筋材的温度升高至其逆相变激发温度(通常为150~200 °C),随后空气冷却,即可迅速产生非常可观的恢复应力(可达600 MPa)。

另一方面,持续交变动荷载导致的低周(超低周)疲劳破坏是强震作用下结构失效的主要原因之一,且一旦发生大范围不可逆的结构损伤,修复往往十分困难,将造成严重的经济损失甚至社会秩序失控。以钢结构耗能构件为例,要求构件本身具有良好的滞回耗能性能和抗低周疲劳能力。然而,即使是无明显构造缺陷且设计合理的耗能构件在数十次大应变循环下仍然会失效,呈现“超低周”延性断裂特征。遗憾的是,这类破坏与钢材本身的物理特性相关,是目前较难突破的瓶颈。尽管可在震后修复或更换耗能构件,但仍存在残余变形显著、更换契合度低、人员进场风险大等问题,且更换构件过程本身会造成结构抗侧能力的临时削弱,造成安全隐患。基于此,延长耗能构件服役寿命、减少乃至避免耗能构件在震后的更换频次为解决上述问题提供了新思路。Fe-SMA极佳的抗低周疲劳能力于2006年首次受到日本学者<sup>[2]</sup>的关注,其低周疲劳寿命可达结构用钢的10倍以上。Fe-SMA的塑性应变由马氏体可逆相变提供,而非传统金属中晶体的永久位错滑移;通过晶界可逆运动适应变形,降低了材料对初始缺陷的敏感性,缓和了内部应力集中,延缓了杂质和次级粒子等所引发的空穴增长<sup>[2-3]</sup>。这意味着Fe-SMA在土木工程中的应用范围得到进一步拓展,Fe-SMA有望成为抗震韧性结构领域具有广阔

前景的新兴功能材料之一。

总体而言,Fe-SMA在土木工程领域的应用方兴未艾。本文首先对Fe-SMA的基本特性进行梳理和介绍,继而对基于该材料的关键技术进行归纳和分析,最后对下一阶段的研究方向进行展望。

## 1 Fe-SMA的材料特性

Fe-SMA具有强度高、延性好、耗能能力强等特点,这与Fe-SMA的马氏体相变密不可分。以下重点介绍Fe-SMA马氏体相变的微观机理,在此基础上分析其宏观力学特性;最后简要介绍Fe-SMA的耐腐蚀性、可焊性等关键性能。

### 1.1 马氏体相变

#### 1.1.1 相变机理

Fe-SMA的马氏体相变涉及两种主要金相:呈面心立方晶格(face-centered cubic, fcc)的 $\gamma$ -奥氏体相( $\gamma$ -austenite,即母相)和呈六方密排堆积(hexagonal close-packed structure, hcp)的 $\epsilon$ -马氏体相( $\epsilon$ -Martensite)。维持以上两种相态稳定的温度区段不同,采用零应力状态下Fe-SMA的4个相变特征温度点划分,即:马氏体相变起始温度 $M_s$ ;马氏体相变结束温度 $M_f$ ;奥氏体相变起始温度 $A_s$ ;奥氏体相变结束温度 $A_f$ 。习惯将奥氏体相转变为马氏体相的过程称为正相变(简记为: $\gamma \rightarrow \epsilon$ ),反之称为逆相变(简记为: $\epsilon \rightarrow \gamma$ )。

Fe-SMA的形状记忆效应源于 $\gamma \rightleftharpoons \epsilon$ 马氏体正逆相变(简记为: $\gamma \rightleftharpoons \epsilon$ ),相变过程依赖于应力诱发Shockley不全位错及其可逆移动<sup>[4-5]</sup>。常温施加预应变时,部分 $\gamma$ -奥氏体转变为 $\epsilon$ -马氏体,并在随后的升温加热过程中得到恢复。Fe-SMA形状记忆效应的实现路径如图1、图2中路径①②③所示(图1中④⑤表征不同温度下Fe-SMA发生大变形时的相变历程)。Fe-SMA在卸载过程中往往伴随有一定程度的非线性“回弹”( $\epsilon_{pse}$ ,见图2),这种现象称之为伪弹性(pseudoelastic)<sup>[6-7]</sup>。Fe-SMA的伪弹性特性暗示着在低应力状态下部分 $\epsilon$ -马氏体无需升温即可激发逆相变。伪弹性应变可按如下公式计算<sup>[8]</sup>:

$$\epsilon_{pse} = (\epsilon_{max} - \epsilon_{min}) - \epsilon_{max}/E \quad (1)$$

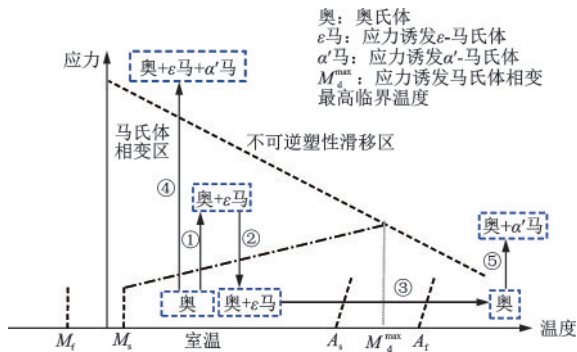


图1 Fe-SMA相变图

Fig.1 Phase changes of Fe-SMA

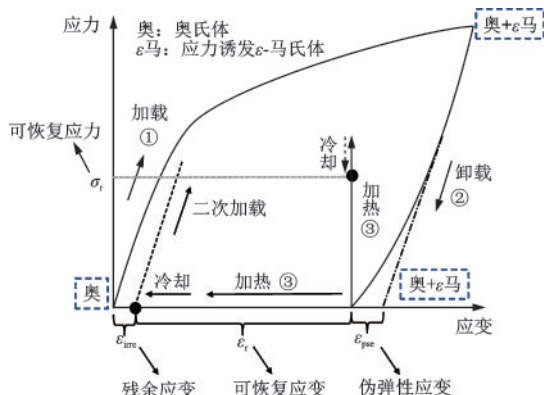


图2 Fe-SMA形状记忆效应原理

Fig.2 Configuration of shape memory effect of Fe-SMA

式中,  $\epsilon_{max}$  和  $\epsilon_{min}$  分别为卸载前的应变峰值和卸载后的应变值;  $E$  为  $\gamma$ -奥氏体相 Fe-SMA 弹性模量。

### 1.1.2 恢复应力与恢复应变

工程上习惯采用恢复应力(recovery stress)与恢复应变(recovery strain)来量化 Fe-SMA 的形状记忆效应。激形状记忆效应时若不对试件自由端施加约束, 可通过测量试件的变形回复率获得恢复应变  $\epsilon_r$ ; 若施加约束, 则可获得恢复应力  $\sigma_r$  (见图 2)。增加预应变虽然能够在一定程度上提高恢复应力值, 但并不意味着二者线性相关。研究[9]表明, 预应变超过 4% 后 Fe-SMA 的恢复应力值不再显著增长, 甚至会由于亚结构发生不可逆塑性滑移而有所回落。

图 3 是典型的受约束 Fe-SMA 热驱动恢复应力-温度关系曲线示意图。受热之初 Fe-SMA 由于金属热膨胀导致应力松弛(A→B); 待温度达到  $A_s$  附近后, Fe-SMA 开始发生  $\epsilon \rightarrow \gamma$  相变, 虽然金属热膨胀继续导致应力松弛, 但此时逆相变产生的恢复应力开始逐步增加, 约束端测得的应力值开始回升(B→C); 当加热温度  $T_{max}$  超过  $A_s^*$  后,  $\epsilon \rightarrow \gamma$  相变过程

结束, Fe-SMA 此时基本呈  $\gamma$ -奥氏体相态(C点)。降温过程: 降温初期, Fe-SMA 冷却收缩, 在约束端产生拉力, 应力值进一步提高(C→D, 此阶段的应力值与温度呈线性相关); 此后 Fe-SMA 继续发生收缩, 收缩应力开始超出线弹性应力区间, 此阶段的应力值继续提高, 但不再与温度线性相关(D→E, D点对应的应力值即为 Fe-SMA 的名义屈服应力  $\sigma_{0.2}$ ); 当应力值达到  $\epsilon$ -马氏体相变临界应力后, Fe-SMA 再次发生  $\gamma \rightarrow \epsilon$  相变, 应力值有所回落(E→F); 待温度降回室温  $T_0$ , 此时所测得的应力值即为 Fe-SMA 的最终恢复应力  $\sigma_r$  (F点)。Y.H.Wen 等<sup>[10]</sup> 基于以上关系曲线给出了最终恢复应力  $\sigma_r$  的计算公式, 即:

$$\sigma_r = E [\epsilon_{\epsilon \rightarrow \gamma}^{T_{max}} - \alpha(T - T_0) - \epsilon_p^{T, \sigma_r} - \epsilon_{\gamma \rightarrow \epsilon}^{T, \sigma_r}] \quad (2)$$

式中,  $\epsilon_{\epsilon \rightarrow \gamma}^{T_{max}}$  指从室温  $T_0$  加热到最高温度  $T_{max}$  过程中由  $\epsilon \rightarrow \gamma$  相变产生的应变值;  $\alpha$  为 Fe-SMA 热膨胀系数;  $\epsilon_p^{T, \sigma_r}$  为上述冷却过程 DE 段的回缩塑性应变值;  $\epsilon_{\gamma \rightarrow \epsilon}^{T, \sigma_r}$  为冷却过程 EF 段  $\gamma \rightarrow \epsilon$  相变诱发的回缩应变值。显然, 若能抑制冷却过程发生的塑性蠕变以及  $\gamma \rightarrow \epsilon$  相变回缩应变值, 则 Fe-SMA 的最终恢复应力有望进一步提升。目前常用的提升 Fe-SMA 恢复应力的手段包括优化加工热处理参数、抑制退火孪晶的形成、控制奥氏体晶粒尺寸、热循环及热机械循环训练、改良 Fe-SMA 合金元素成分等。

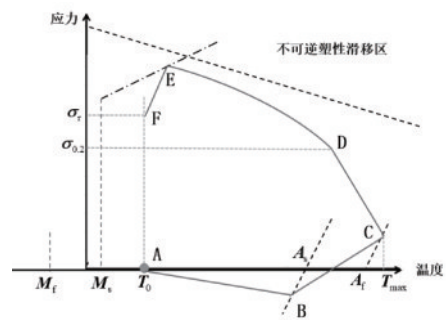


图3 激发 Fe-SMA 恢复应力示意

Fig.3 Schematic diagrams for activating recovery stress of Fe-SMA

## 1.2 Fe-SMA 单调加载力学性能

我国现行的《建筑抗震设计规范》<sup>[11]</sup> 以及《钢结构设计标准》<sup>[12]</sup> 通过规定屈强比(实测值应不大于 0.85)及断后伸长率(不低于 20%)等指标来确保结构用钢具备足够的延性和塑性变形能力。

图4对比了三种不同合金配比的Fe-SMA和另外三种结构用钢材(316L不锈钢、LYP100低屈服点钢以及高强钢Q690)的单调拉伸应力—应变关系曲线。可以看到,相比于低屈服点钢,Fe-SMA没有明显屈服点,在整个拉伸过程80%以上的应变范围内,其应力—应变路径呈上升态势,在达到峰值应力后,应力值在很小的应变范围内发生回落后,试件即发生断裂。应力—应变间的增长/回落关系可理解为材料内部真实应力提升幅度与试件几何非线性收缩变化导致承载力下降二者间的对弈。由此判知,在单调拉伸大部分应变范围内(40%以上),Fe-SMA试棒的变形呈均匀分布态势,无明显颈缩区段;在达到峰值应力附近时(对应承载力在 $0.95\sigma_u$ 左右),材料开始在局部累积较为明显的塑性应变;在达到峰值应力后,颈缩区段的变形更加明显,此后在很小的应变区段内,材料内部空穴开始扩展贯通,导致材料断裂。笔者在对Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni光圆试棒进行单调拉伸试验时观察到的现象进一步印证了以上观点。试件拉伸断时刻,发出“崩”清脆剧烈的响声。试件断口较为粗糙,断口内分布大量凸起与凹陷,呈延性断裂特征(断裂试件及断口样貌见图5)。

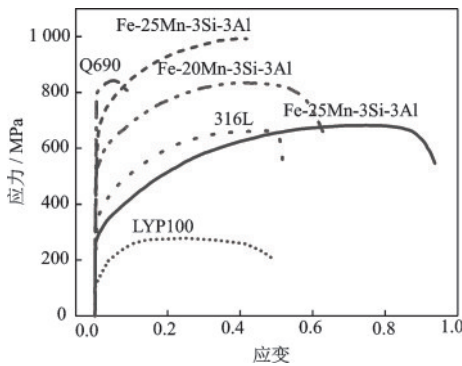


图4 几种典型金属材料的单调应力—应变曲线  
Fig.4 Tensile stress-strain curves of several typical metals

通过对比图4中三种不同合金配比Fe-SMA应力—应变曲线可知,Mn元素含量占比对Fe-SMA的极限承载力有较大影响,低含锰量(15%~20%)Fe-SMA的极限强度总体上高于高含锰量(>25%)Fe-SMA。E. Grassel等<sup>[13]</sup>、G. Frommeyer<sup>[14]</sup>等的研究进一步表明,在添加Al元素后Fe-SMA强度与延性可得到进一步提升(此时的断裂应变甚至可以达到80%以上);低含锰量(15%~20%)与高含锰量(>25%)的Fe-Mn-Si-Al会分别由于马氏体相变过

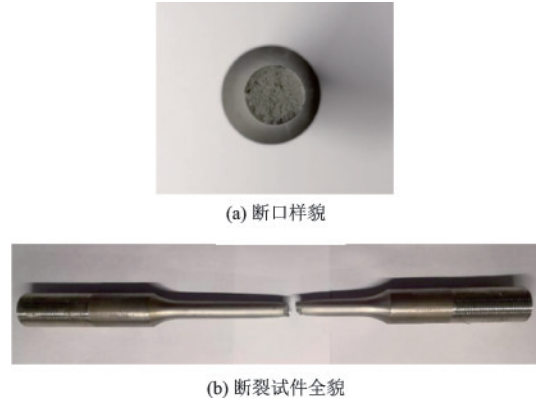


图5 Fe-SMA单调拉伸试件  
Fig.5 Fe-SMA monotonic tensile specimen

程(transformation-induced plasticity, TRIP)和机械孪晶的生成过程(twinning-induced plasticity, TWIP)而导致其强度与塑性变形能力提高。此外,E. Grassel等<sup>[13]</sup>的研究表明,加载速率对Fe-SMA的应力—应变增长路径有显著影响,呈率相关态势。

通常而言,对于屈服点不明显的材料,建议采用0.2%残余应变对应的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为其条件屈服应力。B. Schranz等<sup>[15]</sup>建议采用修正后的Ramberg-Osgood模型<sup>[16]</sup>拟合Fe-SMA的应力—应变曲线:

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, & \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left( \epsilon_u - \frac{\sigma_u - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} - \epsilon_{0.2} \right) \cdot \left( \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \epsilon_{0.2}, & \sigma > \sigma_{0.2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $E_0$ 为Fe-SMA初始线刚度(初始割线模量); $\epsilon_{0.2}$ 为 $\sigma_{0.2}$ 所对应的应变; $E_{0.2}$ 为名义屈服应力 $\sigma_{0.2}$ 处的切线模量,按式(4)计算; $\sigma_u$ 为极限抗拉强度; $\epsilon_u$ 为对应于 $\sigma_u$ 的应变; $n$ 和 $m$ 分别为第一阶段( $\sigma \leq \sigma_{0.2}$ )和第二阶段强化指数;在对Fe-SMA单调拉伸应力应变曲线进行拟合后建议,对于第一阶段强化指数 $n$ ,可沿用文献[16]给出的计算公式(式(5));然而对于第二阶段强化指数 $m$ ,则需在获得大量试验数据后重新回归适用于标定Fe-SMA的计算公式。

$$E_{0.2} = \frac{E_0}{1 + 0.002n \frac{E_0}{\sigma_{0.2}}} \quad (4)$$

$$n = \frac{\ln 20}{\ln \left( \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}} \right)} \quad (5)$$

表 1 Fe-SMA、316L 不锈钢及 NiTi-SMA 基本材料特性

Table 1 Basic material properties of Fe-SMA, 316L stainless steels and NiTi-SMA

材料特性	Fe-SMA <sup>[17]</sup>	316L <sup>[18]</sup>	NiTi-SMA <sup>[19]</sup>
熔点/°C	1 320~1 350	1 370~1 397	1 240~1 310
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	7.2~7.5	8	6.45
热膨胀系数/(°C <sup>-1</sup> )	16.5×10 <sup>-6</sup>	(16~18.5)×10 <sup>-6</sup>	(6.6~11.3)×10 <sup>-6</sup>
热导系数/(W·(m·°C) <sup>-1</sup> )	8.368	16.3~21.5	14~28
弹性模量/GPa	170	200	21~83
屈服强度/MPa	200~300	275 <sup>[20]</sup>	70~690
抗拉强度/MPa	680~1 000	>515	895~1 900
最大伸长率/%	>40	>40	>15
泊松比	0.359	0.29 <sup>[20]</sup>	0.33
可恢复应力/MPa	200~350	—	—

材性试验结果表明(表 1),Fe-SMA 的名义屈服应力  $\sigma_{0.2}$  通常在 200~300 MPa 左右(与低碳钢水平相当),极限抗拉强度可达 680 MPa 以上;屈强比小于 0.5,断后伸长率普遍在 40% 以上,表现出高强度高韧特性。与一般软钢相比,Fe-SMA 的应变硬化效应更显著(这是 fcc→hcp 的典型特征<sup>[8]</sup>)。这些新特点在结构设计中会产生新特性,需加以考虑。

### 1.3 Fe-SMA 循环加载力学性能

根据金属材料在循环加载下的应变幅以及疲劳寿命  $N_f$ ,通常可将循环加载类型分为高周( $N_f > 10^5$ )、低周( $N_f < 10^5$ )以及超低周( $N_f < 10^2$ )循环加载。

相关学者<sup>[21-22]</sup>对 Fe-SMA 经历高周循环加载后的形状记忆效应展开研究,试验结果表明,Fe-SMA 的恢复应力会随着高周循环加载的深入而逐渐衰减,这种应力松弛现象源于 Fe-SMA 的马氏体相变疲劳(transformation-induced relaxation);经二次升温激活后,松弛的应力基本可得到恢复,这意味着在结构运维阶段 Fe-SMA 元件无需拆卸,通过升温即可实现预应力水平的恢复。

L. Janke、T. Sawaguchi 等<sup>[1-2]</sup>率先对 Fe-SMA 低周循环加载下的微观相变机理展开研究。如图 6 所示,Fe-SMA 在受拉过程中(图 6(a), $\epsilon=3.3\%$ ),一部分  $\gamma$ -奥氏体转变为拉应力诱发马氏体;在随后的卸载过程中逐渐湮灭、回归  $\gamma$ -奥氏体相(图 6(b), $\epsilon=-0.2\%$ );此后的反向压缩过程又有一部分  $\gamma$ -奥氏体转变为压应力诱发马氏体(图 6(c), $\epsilon=-2.0\%$ ),持续的拉压循环加载可以维持拉应力诱发马氏体和压应力诱发马氏体的相互转换。这种双向的马

氏体正逆相变过程减少了材料内部应力集中,抑制了因位错的局部累积而导致疲劳裂纹的萌发与传播。这与传统金属材料的疲劳断裂机理(微裂纹一旦产生即沿晶界快速传播)并不相同。

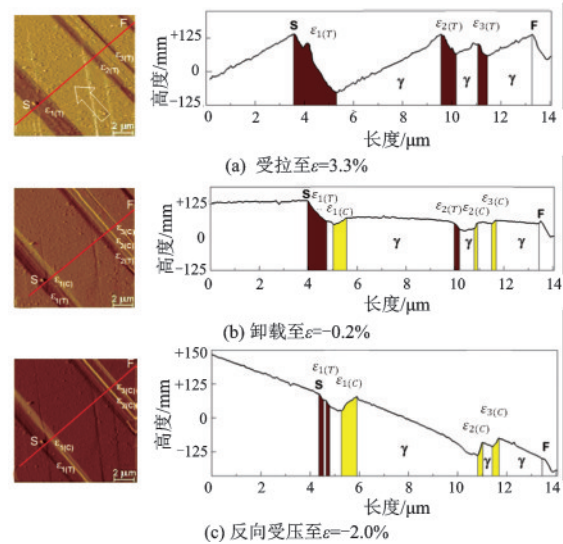


图 6 拉压循环加载下 Fe-SMA 的显微组织变化<sup>[3]</sup>

Fig.6 Microstructure changes of Fe-SMA under tension and compression cycles<sup>[3]</sup>

金属材料在低周循环加载下的硬化特性一定程度上可反映其在地震作用下的承载力变化。图 7 对比了 SUS304 不锈钢和 Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.5NbC 在不同应变幅低周循环加载下的峰值应力-循环圈数演化曲线。可以发现,SUS304 呈现出小应变幅下先软化后硬化、大应变幅下不饱和硬化的特征。这主要是由于随着应变幅的增大和循环加载的进行,SUS304 内的  $\alpha'$ -马氏体相逐渐生成和大量累积,提高了材料的抗变形能力,促使 SUS304

在大应变幅下呈现不饱和硬化的特征;而SUS304在小应变幅加载初期几乎没有 $\alpha'$ -马氏体相生成,故而呈现软化特性。与之形成对比的是,Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.5NbC呈现出较为稳定的饱和强化趋势,这主要得益于上述双向马氏体正逆相变过程抑制了位错的局部累积和 $\alpha'$ -马氏体相的快速生成。

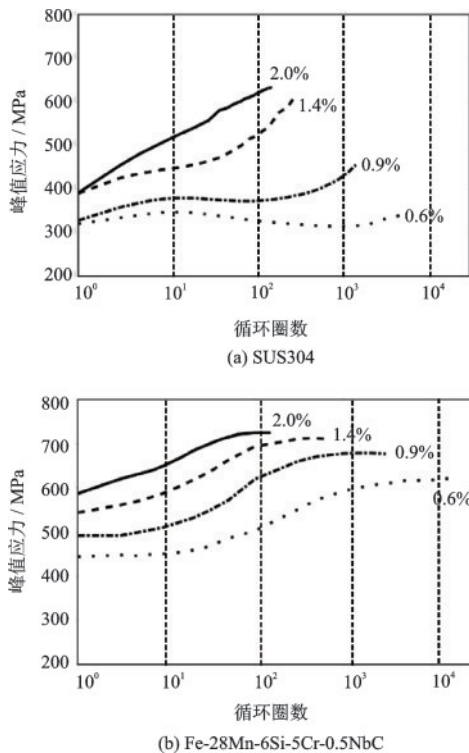


图7 不同应变幅下SUS304、Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.5NbC峰值应力-循环圈数演化曲线对比<sup>[23]</sup>  
Fig.7 Comparison of peak load-fatigue life curves of SUS304 and Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.5NbC under different strain amplitudes<sup>[23]</sup>

对一批Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni光圆短试棒进行大应变等幅循环加载试验( $\pm 1\%$ 、 $\pm 3\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 7\%$ 、 $\pm 9\%$ ,试验结果见图8)后发现,Fe-SMA在拉/压循环卸载段均呈现出较为明显的伪弹性回弹现象(即卸载段遵循胡克定律演化的区段较短,在应力尚未完全卸载至零值时,应力-应变便已偏离弹性关系),这使得Fe-SMA稳定滞回环在拉 $\rightarrow$ 压循环过渡段曲线更加平顺。同时,在大应变等幅循环( $\pm 3\%$ 以上)加载下,Fe-SMA的应力应变路径在即将到达拉/压峰值应变附近时呈现出应力二次强化的特点,稳定滞回环类似“叶片”状,这种现象可归结为大应变等幅循环加载下拉/压应力诱发马氏

体的累积以及二者间的相互过渡转换。D. I. H. Rosa等<sup>[24]</sup>的研究进一步表明,Fe-SMA的循环硬化行为具有加载速率相关性:在中低加载速率(0.8%/s)下,Fe-SMA展现出循环硬化特性;然而在高速率加载时(8%/s),Fe-SMA呈现出一定程度的循环软化,同时试件表面温度急剧升高(可达75 $^{\circ}$ C)。

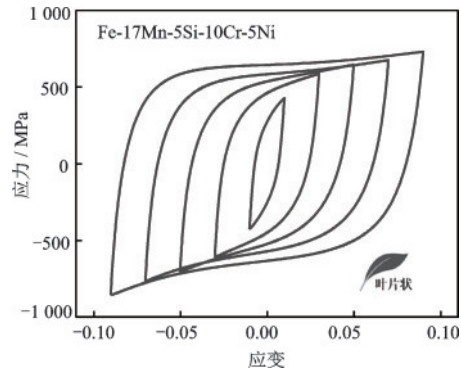


图8 Fe-SMA不同应变幅下的稳定滞回环  
Fig.8 Stable hysteresis loops of Fe-SMA under different strain amplitudes

Fe-SMA独特的滞回应力-应变关系不同于传统结构用钢材,采用Fe-SMA设计的耗能构件势必呈现出新的耗能-安定特性,需要引起设计人员的注意。

通常采用Basquin-Coffin-Manson模型来描述金属材料在循环加载下的应变-疲劳寿命关系<sup>[25]</sup>,Basquin-Coffin-Manson公式可表达为:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \epsilon_f' (2N_f)^c \quad (6)$$

式中, $N_f$ 为循环加载圈数; $\Delta\epsilon$ 为总应变幅; $\sigma_f'$ 为疲劳强度系数; $\epsilon_f'$ 为疲劳延性系数; $b$ 为疲劳强度指数; $c$ 为疲劳延性指数。如前所述,低周循环加载下Fe-SMA特有的双向马氏体正逆相变行为有效抑制了疲劳裂纹的萌生与传播,从而显著提高了Fe-SMA的低周/超低周疲劳寿命<sup>[26]</sup>。相同应变幅下Fe-SMA的低周疲劳寿命约为其他金属材料的10倍以上。Fe-SMA及其他金属材料在低周循环加载下的疲劳寿命见图9和表2。根据试验结果标定的Basquin-Coffin-Manson疲劳寿命参数取值见表3。值得一提的是,大尺寸NiTi-SMA元件的低周疲劳性能较差,在数次大应变循环下往往会发生断裂<sup>[27-32]</sup>,相比之下Fe-SMA的低周疲劳寿命大幅提升。

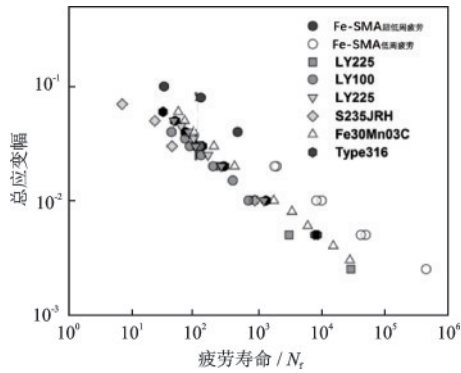


图9 Fe-SMA及其他金属的应变—疲劳寿命关系<sup>[33]</sup>

Fig.9 Strain-fatigue life relationship of Fe-SMA and other metals<sup>[33]</sup>

表2 Fe-SMA及其他结构用钢低周疲劳寿命(±1%应变幅)  
Table 2 Low-cycle fatigue life of Fe-SMA and other structural steels (under ±1% strain amplitude)

金属材料	$N_f$ / 圈	数据来源
Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni	4 007	[34]
Fe-30Mn-4Si-2Al	8 070	[35]
Fe-30Mn-6Si	2 024	[35]
Fe-30Mn-5Si-1Al	2 080	[35]
Fe-30Mn-3Si-3Al	2 112	[35]
S355	495~732	[25]
S235	439~521	[25]
SUS304	164	[23]
LY225	1 220	[36]
LY160	1 008	[36]
LY100	512~694	[36]

#### 1.4 其他物理性能

Fe-SMA的耐腐蚀性优于普通钢材,已有研究<sup>[37]</sup>发现,其耐腐蚀性很大程度上受Mn元素质量占比影响。相比于高Mn含量,低Mn含量(≤

15%wt)的Fe-SMA具有更优的耐腐蚀性。这意味着在使用高Mn含量Fe-SMA时,宜采取涂层法、镀层法等传统钢结构防腐措施进行保护。C.A.D.Rovere等<sup>[38-39]</sup>在Fe-SMA中添加Co元素后,研发出可媲美SUS304不锈钢耐腐蚀性能的Fe-8Mn-5Si-13Cr-6Ni-12Co-(C)合金;但由于Mn含量的大幅降低,其形状记忆效应有所折减,且低周循环加载下的耐疲劳性能未有研究。另外,对于工程领域所关心的应力腐蚀及腐蚀疲劳等问题亟需进一步研究。

金属的可焊性亦是土木工程行业较为关注的性能指标。截至目前,仅有少量学者围绕钨极惰性气体保护电弧焊(TIG)、激光束焊接(LB)、电子束焊接(EB)等方式对Fe-SMA的焊接性能展开研究<sup>[40-42]</sup>。研究结果表明焊缝区的形状记忆效应、耐腐蚀性及抗拉强度与母材相比均略有下降。目前针对Fe-SMA与结构用钢之间的焊接性能研究较少,尤其是土木工程常用的施焊方法(如电弧焊、埋弧焊、气焊等)对于Fe-SMA构件的适用性研究不足。

## 2 Fe-SMA紧固连接与加固应用

### 2.1 Fe-SMA紧固连接元件

Fe-SMA在土木工程中的早期应用主要集中在铁路轨道接头鱼尾板(道夹板)、吊车梁钢轨紧固构件<sup>[43]</sup>、隧道施工钢管肋排连接装置、管道紧固连接器<sup>[44-45]</sup>等方面。利用Fe-SMA在热驱动下变形恢复的特性,可方便地进行接口的紧固连接。以Fe-SMA鱼尾板为例(图10):施工前对Fe-SMA鱼尾板进行预张拉变形,以便使轨道在相对自由的状态下(轨间有间隙)实现初步连接;Fe-SMA鱼尾板在加热激活后逐渐变形恢复,轨间间隙在恢复力作用下逐步闭合,最终实现轨道的“自动”紧固连接。该方案可以简化施工流程、把控连接精度。2003年,日本金

表3 Fe-SMA和几种常见金属的Coffin-Manson公式参数

Table 3 Coffin-Manson formula parameters of Fe-SMA and other structural steels

金属材料	$\sigma'_f$	$b$	$\epsilon'_f$	$c$
Fe-17Mn-5Si-10Cr-5Ni <sup>[34]</sup>	1 333	-0.111	1.896	-0.597
Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.5NbC <sup>[23]</sup>	912	-0.070	0.102	-0.450
Fe-30Mn-4Si-2Al <sup>[35]</sup>	4 073	-0.260	4.629	-0.720
SUS304 <sup>[23]</sup>	1 596	-0.240	0.065	-0.380
LY225 <sup>[36]</sup>	608	-0.103	0.634	-0.567
LY160 <sup>[36]</sup>	573	-0.087	0.524	-0.538
LY100 <sup>[36]</sup>	687	-0.134	0.388	-0.505

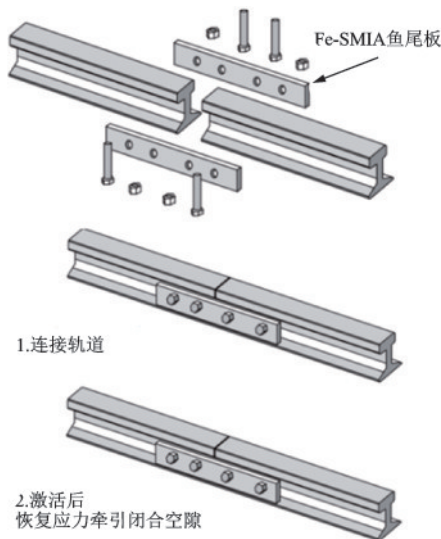


图10 Fe-SMA鱼尾板连接轨道接头<sup>[17]</sup>

Fig.10 Schematic of Fe-SMA fish plate connecting track joint<sup>[17]</sup>

泽市的一处隧道采用了Fe-28Mn-6Si-5Cr管连接器进行施工连接,至今未发生性能劣化。

## 2.2 Fe-SMA 预应力加固技术

### 2.2.1 加固原理

利用Fe-SMA热驱动形状记忆效应加固结构构件最早可追溯到2001年,P. Soroushian等<sup>[46]</sup>对美国密歇根州一段公路桥运用Fe-SMA后张拉预应力筋进行加固补强:利用锚具将预张拉Fe-SMA筋垂直布置于梁体弯剪斜裂缝上;通电加热后,预张拉Fe-SMA筋产生的恢复力通过角钢锚头传递到梁体上,进而促使裂缝闭合。实测结果表明,加固后梁体上最大裂缝宽度减小了约40%(从原来的0.55 mm缩小至0.32 mm),桥梁的承载能力基本得到了恢复。该案例的成功实施意味着预张拉Fe-SMA筋可作为一种高效方便的快速修复补强元件运用到既有结构的运营维护当中。

采用预张拉Fe-SMA筋加固结构构件的施工技术大体可分为两类:一种是将预张拉Fe-SMA筋安装于构件本体之外的无粘结机械锚固法;另一种是将预张拉Fe-SMA筋埋置于构件之中并通过胶凝材料连接的有粘结内裹锚固法。两种方法形式不同,但工作原理类似,可归纳为五个施工步骤(图11):

(1)张拉Fe-SMA筋至预定应变后,卸载;

(2)将预张拉Fe-SMA筋与待加固构件实现可靠连接(连接方法见下文);

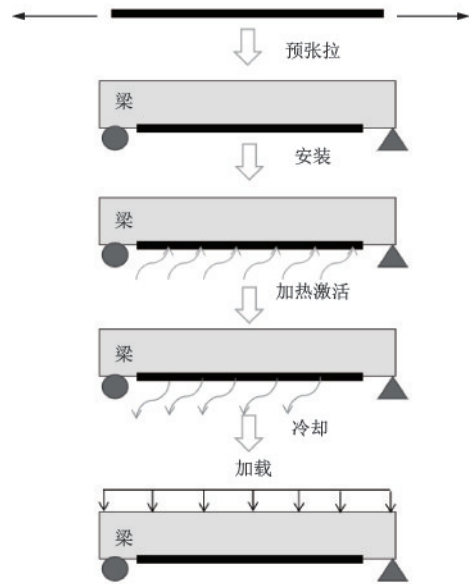


图11 Fe-SMA加固流程

Fig.11 Fe-SMA reinforcement process

(3)将预张拉Fe-SMA筋加热(通电或其他合理的加热方法)至目标温度;

(4)自然冷却至室温;

(5)载荷,构件进入/恢复正常使用状态。

采用Fe-SMA加固结构构件可具有如下优势:与现有外粘碳纤维(CFRP)布/芳纶复合材或钢板加固方法相比,无需考虑环氧树脂界面粘结性能退化的问题,且Fe-SMA可以产生额外的预应力,加固效果更优。与现有的锚固CFRP板材/筋材加固方法<sup>[47]</sup>相比,采用Fe-SMA板材/筋材的施工流程耗时更短;Fe-SMA材料本身延性好、强度高、热膨胀行为与钢/混凝土构件相似,变形协调性优于CFRP;尽管目前Fe-SMA单价约为CFRP的2倍,但综合考虑锚固系统造价、施工人力支出以及总体性能评价等因素后,二者总费用基本持平<sup>[48]</sup>;此外,火灾作用下起粘结作用的环氧树脂会由于高温降解而失效,CFRP的极限强度也会急剧下降,相比之下Fe-SMA在高温下表现出的蠕变松弛具有失效过程渐进性<sup>[49]</sup>。

### 2.2.2 Fe-SMA无粘结机械锚固法

Fe-SMA无粘结机械锚固法与传统体外预应力加固技术均是利用锚具将预应力传递给构件基体;所不同的是,前者在施工时只需对Fe-SMA筋通电加热,无需借助复杂的预应力筋锚固装置进行现场原位张拉,故具有受力明晰、施工方便等优点。上述密歇根州公路桥案例即属此类施工方法。

瑞士联邦材料科学与技术研究所(EMPA)提出了一种基于Fe-SMA片板加固的摩擦机械锚固方法(图12)。由摩擦型高强螺栓、摩擦垫片、绝缘垫片(用以隔绝激活电流流经钢构件)、Fe-SMA片板组成。高强螺栓依次穿过绝缘垫片、摩擦垫片、Fe-SMA片板以及待加固钢构件,在另一侧实现螺母紧固(图12仅为元件排布方法的一种示意)。研究<sup>[50-51]</sup>表明,该加固方法可降低待加固钢板上尖端裂纹附近的应力强度因子,从而显著提高高周疲劳寿命,甚至可以完全抑制疲劳裂纹的发展。

M. Izadi等<sup>[52]</sup>设计了一种与上述摩擦机械锚固概念相似但更适用于工字梁梁底加固的机械锚头(图13),并将其运用在工字钢梁和钢桥节点<sup>[53]</sup>的加固试验上。J. Michels等<sup>[54]</sup>提出了一种适用于混凝土构件快速加固的铆钉直攻Fe-SMA片板无粘结锚固法。只需在Fe-SMA片板与待加固混凝土构件表面对应位置钻孔后直接对孔打入铆钉,即可实现二者的紧密锚固。试验结果表明,该加固方法的破坏路径始于内部钢筋屈服、混凝土溃裂,而锚栓未发生剪切破坏,锚固端的混凝土也未发生剪撬破坏或劈裂破坏。A. Cladera等<sup>[55]</sup>在此基础上采用高强螺栓实现了Fe-SMA片板与T型混凝土梁近支座区域的可靠加固连接。从目前来看,铆钉直攻或高强螺栓已经成为Fe-SMA与混凝土构件连接加固的主要锚固方法。

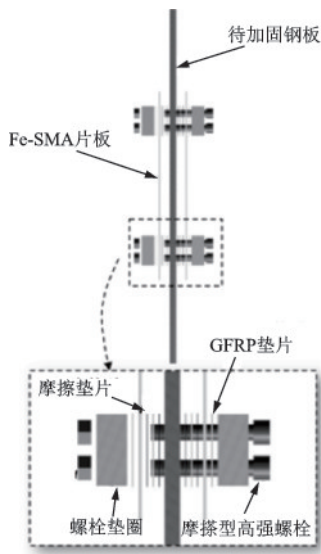


图12 Fe-SMA摩擦机械锚固方法<sup>[56]</sup>

Fig.12 Friction-based Fe-SMA strengthening method for steel plates<sup>[56]</sup>

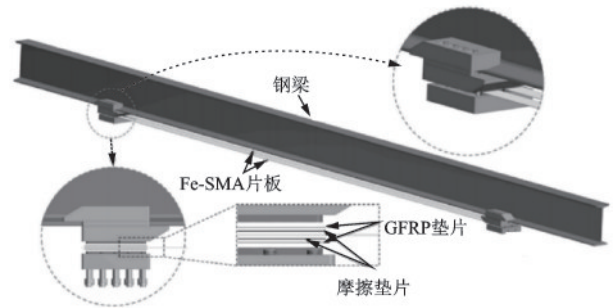


图13 FMS片板-工字梁底加固机械锚头<sup>[53]</sup>

Fig.13 FMS strengthening system for I-beam<sup>[53]</sup>

### 2.2.3 Fe-SMA有粘结内裹锚固法

Fe-SMA有粘结内裹锚固法主要面向混凝土构件的加固。2014年,C. Czaderski等<sup>[56]</sup>提出利用表层嵌贴加固法(Near-surface mounted reinforcement, NSMR)实现Fe-SMA对混凝土构件的加固(图14)。研究表明,Fe-SMA板材/筋材的几何形状<sup>[57-59]</sup>以及锚固长度<sup>[53]</sup>对粘结锚固性能的影响较大,通过合理的设计可使Fe-SMA与胶凝材料间具备充足的锚固强度。M. Shahverdi等<sup>[60]</sup>、K. Hong等<sup>[61]</sup>对采用上述锚固方法的混凝土梁进行抗弯承载力试验,研究发现钢筋与Fe-SMA片板相继屈服、最终因混凝土溃裂而破坏,呈典型的适筋梁破坏模式。结合现场快速施工的需要,M. Shahverdi

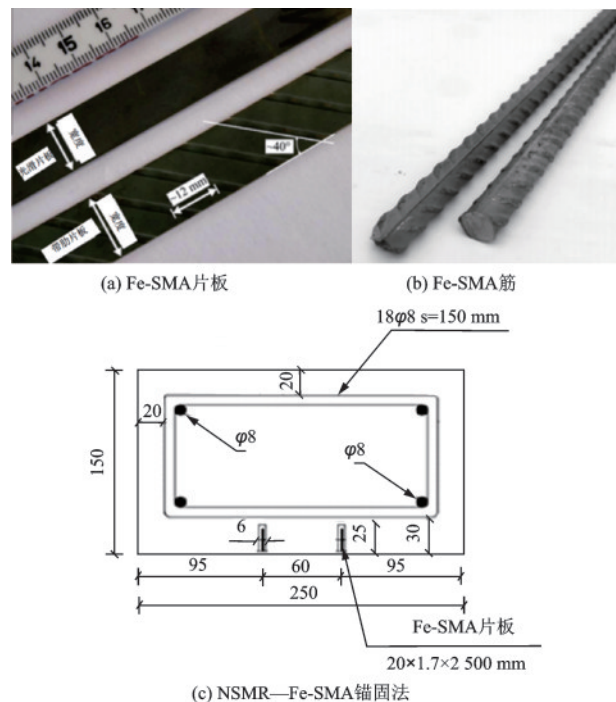


图14 Fe-SMA筋/片板及NSMR-Fe-SMA锚固法<sup>[56-57]</sup>

Fig.14 Schematic diagram of Fe-SMA bar/strip and NSMR-Fe-SMA anchoring method<sup>[56-57]</sup>

等<sup>[62]</sup>、C. Czaderski等<sup>[63]</sup>采用喷射混凝土锚固法实现 Fe-SMA 与混凝土构件的协同工作。

H. Rojop等<sup>[64]</sup>在 NSMR—Fe-SMA 锚固法的基础上添加了机械锚头(图 15),机械锚头由开孔厚钢板和连接螺母组成;带肋 Fe-SMA 与机械锚头连接后,利用膨胀铆钉将机械锚头固定在混凝土构件上。加热激活时,将通电夹头直接与覆盖在 Fe-SMA 筋上的加热带连接。由于该方法具有同时借助锚具与胶凝材料传力的特点,故而可使混凝土梁延性得到进一步加强,但与前述 NSMR—Fe-SMA 锚固法相比其施工流程则稍显复杂。

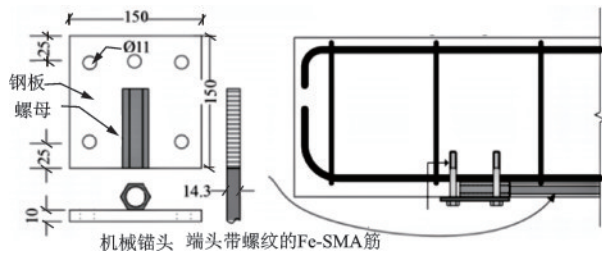


图 15 Fe-SMA—混凝土梁机械-粘结锚固法<sup>[64]</sup>

Fig.15 Fe-SMA—concrete beam machinery-bonding anchoring method<sup>[64]</sup>

### 3 Fe-SMA 的抗震应用

耗能构件在低周(超低周)往复循环加载下的力学行为和抗疲劳性能是评价减震措施可靠性与合理性的重要参考。尤其是当高层建筑遭遇近断层长周期脉冲作用时,部分结构构件尤其是耗能构件将经历动态荷载下的大塑性变形,这对耗能芯材的抗超低周疲劳性能提出了更高的要求。另外,长持时地震与主余震序列也是造成耗能构件损伤累积乃至最终失效的主要原因。

表 4 对比了不同阻尼器的性能。普通钢阻尼器具有成本低、刚度大、承载能力强等优点,但抗低周

表 4 不同阻尼器特征比较<sup>[65-66]</sup>

Table 4 Comparison of characteristics of different dampers<sup>[65-66]</sup>

	钢阻尼器	黏滞阻尼器	Fe-SMA 阻尼器
低周疲劳性能	一般	—	优
滞回耗能性能	优	优	优
刚度/承载力	优	一般	优
耐久性	尚可	不足	优
造价	经济	高	经济

疲劳性能一般,且在防锈蚀方面需要特别处理;黏滞阻尼器耗能稳定,但存在制作成本高、刚度和负载能力较小、耐久性不足(漏油、密封圈老化)等缺点。Fe-SMA 作为一种新兴减震材料,可以很好地解决上述问题,实现低成本、高耗能、高疲劳寿命等关键性能目标。日本工程师<sup>[67]</sup>率先尝试了 Fe-SMA 在减震耗能构件方面的运用,成功研制出 Fe-SMA (Fe-15Mn-4Si-10Cr-8Ni)剪切板阻尼器以及屈曲约束支撑,并分别应用于日本名古屋 JP 塔和日本爱知国际会展中心。

如图 16 所示,Fe-SMA 剪切板阻尼器由 Fe-SMA 芯板、内加劲板、齿合状外加劲板以及位于上下接头处的隔板组成。其中,Fe-SMA 芯板、隔板以及外加劲板通过摩擦型高强螺栓连接。地震作用时,Fe-SMA 芯板发生剪切弹塑性变形进而耗散能量,加劲板为 Fe-SMA 芯板提供屈曲约束。通过对 1/2 缩尺模型开展低周循环加载试验和随机地震波模拟试验表明,Fe-SMA 剪切板阻尼器具有稳定的滞回性能,在试验中没有观察到由于剪切板屈曲而导致的荷载突降,阻尼器在  $\pm 0.04$  名义剪切角的大变形加载下疲劳寿命可达 190 次循环,远高于同类型的低屈服点钢阻尼器;在随机地震波输入下,Fe-SMA 剪切板阻尼器在较宽的加载应变范围内表现出稳定的变形和耗能能力。

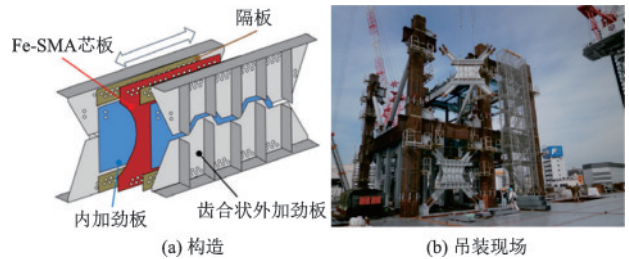
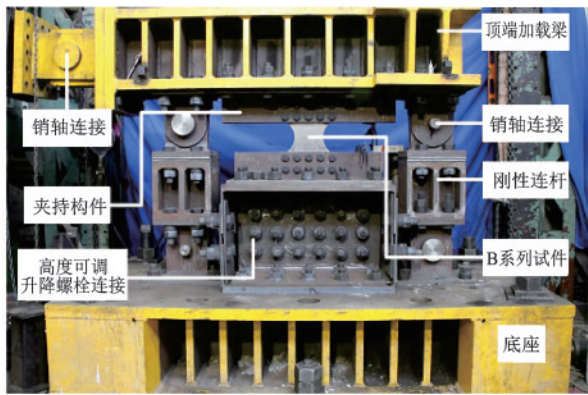


图 16 Fe-SMA 剪切板阻尼器工程应用<sup>[67]</sup>

Fig.16 Practical application of Fe-SMA shear panel damper<sup>[67]</sup>

笔者及其团队<sup>[34]</sup>进一步考察了连接构造方式(焊接、栓接)和屈曲约束条件对 Fe-SMA 剪切板阻尼器滞回性能的影响规律(图 17)。通过与国产 Q235 剪切阻尼器进行对比,发现  $\pm 0.04$  名义剪切角作用下 Fe-SMA 阻尼器的疲劳寿命为 137~170 圈,平均可达 Q235 阻尼器(16 圈)的 10 倍。另外发现 Fe-SMA 芯板与端板的焊缝连接可能提前发生破坏,焊缝本身的疲劳寿命会对阻尼器的抗疲劳性能起控制作用;不施加屈曲约束可能减少阻尼器的疲劳寿命。



(a) 剪切板阻尼器缩尺试验构造

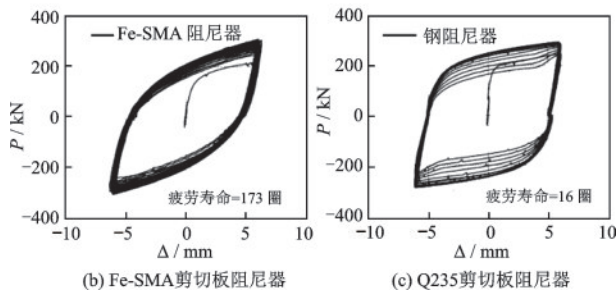


图 17 Fe-SMA 及 Q235 剪切板阻尼器缩尺试验构造及结果对比<sup>[34]</sup>

Fig.17 Details of test setup of Fe-SMA shear damper and Q235 shear damper and the comparison of small-scale test results between them<sup>[34]</sup>

图 18 给出了 Fe-SMA 屈曲约束支撑 (BRB) 的基本构造。屈服耗能芯板 (横截面尺寸 325 mm × 23 mm) 采用 Fe-SMA 制作, 砂浆填充材料和钢管套筒提供屈曲约束; 芯板与肋板焊接, 并通过肋板连接到节点板上。试验表明, 新型 Fe-SMA 屈曲约束支撑具有优异的耐疲劳性能, 其在经历 1 000 圈 ± 0.5% 应变幅 (对应荷载约 2 600 kN) 加载后仍未破坏。对新型 Fe-SMA 屈曲约束支撑展开初始偏心循环加载试验以模拟实际工况下可能存在的平面外失稳问题, 结果显示, 与未施加初始偏心的循环加载试验结果相比, 两次试验的峰值载荷在 1 000 次循环中几乎相同, 这说明新型 Fe-SMA 屈曲约束

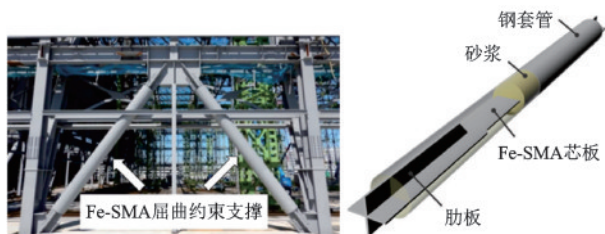


图 18 Fe-SMA 屈曲约束支撑<sup>[67]</sup>

Fig.18 Fe-SMA buckling restrained brace<sup>[67]</sup>

支撑在复杂工况下具有稳定的承载和耗能能力。对循环加载试验后的芯板进行检查, 未在肋尖周围的塑性变形区或焊接部位发现疲劳裂纹, 进一步证实了构造的合理性以及 Fe-SMA 芯板优异的耐疲劳性能。

## 4 结论与展望

(1) 目前对 Fe-SMA 基本力学行为的研究尚处于起步阶段, 构建完善的本构模型尚缺乏足够的支撑, 应力三轴度、动力荷载效应、焊接热影响区等因素对材料性能的影响规律尚不明确, 加载历史对形状记忆效应的影响规律认识不足, 基于微观机理的延性疲劳断裂预测模型尚未有学者进行研究。

(2) 基于摩擦机械锚固的 Fe-SMA-钢构件加固技术受限于施工流程复杂, 难以在实际工程中推广。更为实用便捷的施工流程有待进一步设计和考察。

(3) 加热激活 Fe-SMA 的施工技术标准尚未明确。虽然可以通过施加过量热量以确保激活充分, 但对于混凝土构件而言, 过高的热量会使混凝土基体内钙矾石生成受阻而产生纵向劈裂裂纹。规范化的 Fe-SMA 加热方法有待完善。

(4) 从构件层面来看, Fe-SMA 构件的技术方案尚不成熟与完善。Fe-SMA 的滞回行为与普通钢材不同, 前者具有更加明显的循环强化特征, 需要谨慎地与节点板、节点域、钢梁等周边承力部件进行刚度和强度的匹配设计, 需要对极端情况下构件的形变特点、稳定性态和失效模式进行深入考察; 如果仅对已有构件形式做简单的复制, 很可能引起构件的非预期失效, 影响整体结构的抗震性能。

(5) 与 Fe-SMA 构件相关的结构体系层面的研究尚未开展。新型结构和传统结构在性能目标和设计理念上会有很大的不同, 地震动力响应也可能会有差异。例如, Fe-SMA 由于部分伪弹性效应可能会影响结构的耗能机制和卸载路径, 从而进一步改变结构的动力安定机理, 这种特殊效应对结构峰值响应和残余变形的影响有待研究, 现行钢结构抗震设计方法的适用性有待明确。同时, 需进一步探明 Fe-SMA 阻尼构件的耗能破坏模式、变形相容条件和恢复力机制, 结合经济易损性分析, 建立损伤可控的 Fe-SMA 耗能元组件结构体系设计方法。

## 参考文献:

- [1] Janke L. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures-Overview, limits and new ideas [J]. *Materials and Structures*, 2005, 38(June 2005): 578-592.
- [2] Sawaguchi T, Sahu P, Kikuchi T, et al. Vibration mitigation by the reversible fcc/hcp martensitic transformation during cyclic tension-compression loading of an Fe-Mn-Si-based shape memory alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(11):1885-1890.
- [3] Sawaguchi T, Bujoreanu L G, Kikuchi T, et al. Mechanism of reversible transformation-induced plasticity of Fe-Mn-Si shape memory alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 59(8):826-829.
- [4] Baruj A, Betolino G, Troiani H E. Temperature dependence of critical stress and pseudoelasticity in a Fe-Mn-Si-Cr pre-rolled alloy [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2010, 502(1):54-58.
- [5] Cladera A, Weber B, Leinenbach C, et al. Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures; An overview [J]. *Construction & Building Materials*, 2014(63): 281-293.
- [6] Sawaguchi T, Kikuchi T, Kajiwara S. The pseudoelastic behavior of Fe-Mn-Si-based shape memory alloys containing Nb and C[J]. *Smart Materials & Structures*, 2005, 14(5): S317-S322.
- [7] Lee W J, Weber B, Feltrin G, et al. Phase transformation behavior under uniaxial deformation of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni-VC shape memory alloy[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2013, 581:1-7.
- [8] Arabi-Hashemi A, Lee W J, Leinenbach C. Recovery stress formation in FeMnSi based shape memory alloys: Impact of precipitates, texture and grain size[J]. *Materials & Design*, 2017, 139:258-268.
- [9] Wang C P, Wen Y H, Peng H B. Factors affecting recovery stress in Fe-Mn-Si-Cr-Ni-C shape memory alloys [J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2011, 528: 1125-1130.
- [10] Wen Y H, Li N, Xiong L R. Composition design principles for Fe-Mn-Si-Cr-Ni based alloys with better shape memory effect and higher recovery stress-ScienceDirect[J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2005, 407(1/2):31-35.
- [11] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2018.
- [13] Ghafoori E, Hosseini E, Leinenbach C, et al. Fatigue behavior of a Fe-Mn-Si shape memory alloy used for prestressed strengthening-ScienceDirect [J]. *Materials & Design*, 2017, 133:349-362.
- [14] Frommeyer G, Brux U, Neumann P. Supra-ductile and high-strength manganese TRIP/TWIP steels for high energy absorption purposes[J]. *Isij International*, 2003, 43(3):438-446.
- [15] Schranz B, Czaderski C, Shahverdi M, et al. Ribbed iron-based shape memory alloy bars for pre-stressed strengthening applications [C]// International Association for Bridge and Structural Engineering Symposium. Guimarães: [s.n.], 2019: 1-8.
- [16] Rasmussen K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(1):47-61.
- [17] Maruyama T, Kubo H. 12-Ferrous (Fe-based) shape memory alloys (SMAs): properties, processing and applications [J]. *Shape Memory & Superelastic Alloys*, 2011:141-159.
- [18] 不锈钢和耐热钢牌号及化学成分:GB/T 20878—2007 [S]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- [19] 方成, 王伟, 陈以一. 基于超弹性形状记忆合金的钢结构抗震研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(7): 1-12.  
Fang C, Wang W, Chen Y Y. State-of-the-art for application of superelastic shape memory alloy in seismic resistant steel structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(7): 1-12. (in Chinese)
- [20] Roy S C, Goyal S, Sadnha R, et al. Low cycle fatigue life prediction of 316 L(N) stainless steel based on cyclic elasto-plastic response [J]. *Nuclear Engineering & Design*, 2012, 253:219-225.
- [21] Ghafoori E, Hosseini E, Leinenbach C, et al. Fatigue behavior of a Fe-Mn-Si shape memory alloy used for prestressed strengthening-ScienceDirect [J]. *Materials & Design*, 2017, 133: 349-362.
- [22] 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, 637:29-39.
- [23] Nagashima N, Sawaguchi T, Ogawa K. Low Cycle Fatigue Properties of Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.5NbC Alloy[J]. *Tetsu to Hagane*, 2016, 102(9):517-524.
- [24] Rosa D I H, Hartloper A, Sousa A D C E, et al. Experimental behavior of iron-based shape memory alloys under cyclic loading histories[J]. *Construction and*

- Building Materials, 2021, 272:1-14.
- [25] Nip K H, Gardner L, Da V C M, et al. Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(1): 96-110.
- [26] Nagashima N, Sawaguchi T. Influence of transformation pseudoelasticity and accumulated plastic strain on low cycle fatigue characteristics of Fe-30Mn-4Si-2Al alloy [J]. Tetsu to Hagane, 2018, 104(7):393-399.
- [27] Fang C, Yam M C H, Lam A C C, et al. Cyclic performance of extended end-plate connections equipped with shape memory alloy bolts[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 94: 122-136.
- [28] Fang C, Wang W, He C, et al. Self-centring behaviour of steel and steel-concrete composite connections equipped with NiTi SMA bolts [J]. Engineering Structures, 2017, 150: 390-408.
- [29] 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.
- [30] Fang C, Yam M C H, Chan T M, et al. A study of hybrid self-centring connections equipped with shape memory alloy washers and bolts[J]. Engineering Structures, 2018, 164: 155-168.
- [31] Fang C, Wang W, Ricles J, et al. Application of an innovative SMA ring spring system for self-centering steel frames subject to seismic conditions[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2018, 144(8): 04018114.
- [32] Fang C, Wang W, Zhang A, et al. Behavior and design of self-centering energy dissipative devices equipped with superelastic SMA ring springs[J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 2019, 145(10): 04019109.
- [33] Nikulin I, Sawaguchi T, Kushibe A, et al. Effect of strain amplitude on the low-cycle fatigue behavior of a new Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si seismic damping alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2016, 88:132-141.
- [34] Fang C, Wang W, Ji Y Z, et al. Superior low-cycle fatigue performance of iron-based SMA for seismic damping application [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 184:1-15.
- [35] Tsuzaki K. Effect of alloying composition on low-cycle fatigue properties and microstructure of Fe-30Mn-(6-x)Si-xAl TRIP/TWIP alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 587: 192-200.
- [36] 施刚,高阳,王珣,等.低屈服点钢低周疲劳性能研究 [J].土木工程学报, 2019,52(1): 20-26,52.
- Shi G, Gao Y, Wang X, et al. Low cycle fatigue properties of low yield point steels[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 20-26, 52. (in Chinese)
- [37] Ma R, Peng H, Wen Y, et al. Oxidation behavior of an austenitic stainless Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy [J]. Corrosion science, 2013, 66: 269-277.
- [38] Rovere C A D, Alano J H, Silva R, et al. Influence of alloying elements on the corrosion properties of shape memory stainless steels [J]. Materials Chemistry & Physics, 2012, 133(2/3): 668-673.
- [39] Rovere C A D, Alano J H, Otubo J, et al. Corrosion behavior of shape memory stainless steel in acid media [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509: 5376-5380.
- [40] Lin H C, Lin K M, Chuang Y C, et al. The welding characteristics of Fe-30Mn-6Si and Fe-30Mn-6Si-5Cr shape memory alloys [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2000, 306(1/2): 186-192.
- [41] Dong Z Z, Sawaguchi T, Kajiwara S, et al. Microstructure change and shape memory characteristics in welded Fe-28Mn-6Si-5Cr-0.53Nb-0.06C alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 438: 800-803.
- [42] Qiao Z, Li L, Wang D, et al. Microstructure and shape recovery characteristics in a TIG-welded Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloy [C]// International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering. Harbin: International Society for Optics and Photonics, 2007: 1-6.
- [43] Maruyama T, Kurita T, Kozaki S, et al. Innovation in producing crane rail fishplate using Fe-Mn-Si-Cr based shape memory alloy [J]. Materials Science and Technology, 2008, 24(8):908-912.
- [44] Tanahashi H, Maruyama T, Kubo H. Applications of Fe-Mn-Si alloy for pipe joints [J]. Ecomaterials, 1994: 1149-1154.
- [45] Kajiwara S, Baruj A L, Kikuchi T, et al. Low-cost high-quality Fe-based shape memory alloys suitable for pipe joints [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003, 5053:250-261.
- [46] Soroushian 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: 20-26.
- [47] Hosseini A, Ghafoori E, Motavalli M, et al. Flat prestressed unbonded retrofit system for strengthening of existing metallic I-Girders [J]. Composites Part B, 2018, 155: 156-172.

- [48] Hosseini A, Michels J, Izadi M, et al. A comparative study between Fe-SMA and CFRP reinforcements for prestressed strengthening of metallic structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226: 976-992.
- [49] Ghafoori E, Neuenschwander M, Shahverdi M, et al. Elevated temperature behavior of an iron-based shape memory alloy used for prestressed strengthening of civil structures [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 211: 437-452.
- [50] Izadi M R, Ghafoori E, Shahverdi E M, et al. Development of an iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) strengthening system for steel plates [J]. *Engineering Structures*, 2018, 174:433-446.
- [51] Izadi M R, Ghafoori 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: 953-967.
- [52] Izadi M R, 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.
- [53] Izadi M R, Motavalli M, Ghafoori E. Iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) for fatigue strengthening of cracked steel bridge connections [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227:1-17.
- [54] Michels J, Shahverdi M, Czaderski C, et al. Iron based shape memory alloy strips, part 2: flexural strengthening of RC beams[C]// Fourth International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures.Switzerland: EMPA, 2017: 1-9.
- [55] Cladera A, Montoya-coronado L A, Joaquín G R, et al. Shear strengthening of slender reinforced concrete T-shaped beams using iron-based shape memory alloy strips[J]. *Engineering Structures*, 2020, 221:1-14.
- [56] Czaderski C, Shahverdi M, Broennimann R, et al. Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures [J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 56: 94-105.
- [57] Hong K, Lee S, Han S, et al. Evaluation of Fe-based shape memory alloy (Fe-SMA) as strengthening material for reinforced concrete structures [J]. *Applied Sciences*, 2018, 730 (8): 1-16.
- [58] Schranz B, Czaderski C, Vogel T, et al. Bond investigations of prestressed, near-surface-mounted, ribbed memory-steel bars with full bond length [J]. *Materials & Design*, 2020, 196:1-20.
- [59] Schranz B, Czaderski C, Vogel T, et al. Bond behaviour of ribbed near-surface-mounted iron-based shape memory alloy bars with short bond lengths[J]. *Materials & design*, 2020, 191:1-17.
- [60] Shahverdi M, Czaderski C, Motavalli M. Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams[J]. *Construction & Building Materials*, 2016,112:28-38.
- [61] Hong K, Lee S, Yeon 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(45): 1-13.
- [62] 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, 117:263-273.
- [63] Czaderski C, Shahverdi M, Michels J. Iron based shape memory alloys as shear reinforcement for bridge girders[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 274:1-16.
- [64] Rojob H, El-hacha R. Ductility behavior of RC beams strengthened in flexure with NSM Iron-based shape memory alloy bars [C] //Third Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures.Switzerland: EMPA, 2015: 1-8.
- [65] Symans MD, Charney F A, Whittaker A S , et al. Energy dissipation systems for seismic applications: current practice and recent developments [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(1):3-21.
- [66] De Domenico D, Ricciardi G, Takewaki I. Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: A review [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 118:144-165.
- [67] Inoue Y, Kushibe A, Umemura K, et al. Fatigue-resistant Fe-Mn-Si-based alloy seismic dampers to counteract long-period ground motion [J]. *Japanese Architecture Review*, 2021, 4(1):76-87.

(本文责编:池营营)