

# 形状记忆合金

监测与控制智能系统

毛晨曦 编著  
张亮泉

东北林业大学出版社

# 形状记忆合金监测与控制智能系统

毛晨曦 张亮泉 编著

东北林业大学出版社

---

图书在版编目 (CIP) 数据

形状记忆合金监测与控制智能系统/毛晨曦, 张壳泉编著. —哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2007.6

ISBN 978-7-81131-024-5

I. 形… II. ①毛… ②张… III. 形状记忆合金—研究 IV. TG139

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 088706 号

---

责任编辑: 姜俊清

封面设计: 魏丽娜



NEFUP

形状记忆合金监测与控制智能系统

Xingzhuang Jiyi Hejin Jiance Yu Kongzhi Zhineng Xitong

毛晨曦 张壳泉 编著

东北林业大学出版社出版发行

(哈尔滨市和兴路 26 号)

哈尔滨市工大节能印刷厂印装

开本 850 × 1168 1/32 印张 5.25 字数 125 千字

2007 年 6 月第 1 版 2007 年 6 月第 1 次印刷

印数 1—1 000 册

ISBN 978-7-81131-024-5

TC·6 定价: 15.00 元

# 前 言

结构健康监测与结构振动控制是土木工程领域的多学科交叉和前沿研究方向。结构健康监测提供了结构地震反应的现场观测技术,为揭示结构地震非线性损伤机理和破坏倒塌机制开辟了崭新的途径,同时结构健康监测系统监测的信息为实施结构振动控制提供了反馈信号;结构振动控制已经被证明是减小结构地震反应、改善结构抗震性能的积极有效的方法。因此,结构健康监测与结构振动控制是提高结构抗震性能、减轻地震损失的相互联系的两个重要手段。将结构健康监测与振动控制集一体,将不仅大大简化结构振动控制系统,还将为揭示结构地震非线性损伤机理和破坏倒塌机制、为震后结构抗震性能快速评估提供科学依据。

形状记忆合金(Shape Memory Alloy,简称 SMA)是一种具有多功能特性的智能材料。同时利用 SMA 的感知特性和超弹性特性,可以发展集地震损伤监测与控制于一体的 SMA 智能结构系统。本书以结构地震损伤自监测与自控制一体化 SMA 集成智能系统为主要内容,系统地阐述了 SMA 的超弹性特性及其速率相关型超弹性本构关系模型、感知特性、SMA 阻尼器/位移传感器、地震损伤监测与控制 SMA 智能系统及基于 SMA 阻尼器/位移传感器监测信息的结构完备状态估计和非线性滞变模型识别方法。

全书共 6 章。

第 1 章 形状记忆合金(SMA)及其智能系统的发展概况,除了介绍 SMA 的基本特性,对土木工程中的 SMA 阻尼器与驱动器及 SMA 智能系统的研究现状和发展作了简要概述。

第 2 章 SMA 的本构关系模型,主要介绍 SMA 唯象本构理论模型,以及作者提出的 SMA 速率相关型本构关系模型的建立方法。

第 3 章 NiTi 形状记忆合金应变感知特性研究,重点介绍了 NiTi SMA 的应变感知特性试验,以及 SMA 作为位移传感器的基本性能指标的测量。

第4章 SMA 阻尼器/位移传感器设计,介绍了作者提出的两种新型 SMA 阻尼器/位移传感器的设计原理,以及减振性能比较。

第5章 结构地震反应监测与控制一体化 SMA 智能系统,重点介绍了安装 SMA 阻尼器/位移传感器的缩尺结构模型振动台试验研究,此外针对地震动激励下非线性滞变系统的瞬时频率识别问题进行了探讨。

第6章 结构完备状态响应估计与非线性滞变模型的扩展卡尔曼滤波-小波识别方法,重点介绍了笔者提出的基于扩展卡尔曼滤波和小波多分辨率分析的非线性滞变模型识别方法,为基于 SMA 测量结构响应数据的结构损伤识别和评定提供了理论基础。

本书是在笔者的博士论文基础上进一步总结完成的,在此对导师李惠教授在笔者攻读博士学位期间给予的悉心指导和帮助致以深深的谢意,本书在编写过程中还得到了刘晚成教授的支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中如有不当之处,恳请读者批评指正。

编者  
2007年3月

## 目 录

1 形状记忆合金(SMA)及其智能系统的发展概况 .....	(1)
1.1 SMA 的基本特性 .....	(3)
1.1.1 SMA 的形状记忆效应 .....	(3)
1.1.2 SMA 的超弹性特性 .....	(7)
1.1.3 SMA 的其他特性 .....	(8)
1.2 土木工程中的 SMA 阻尼器和驱动器 .....	(9)
1.2.1 SMA 阻尼器 .....	(9)
1.2.2 SMA 驱动器 .....	(13)
1.3 SMA 智能结构系统 .....	(17)
1.4 其他 SMA 器件 .....	(20)
1.4.1 SMA 自适应紧固件、连接件和密封垫 .....	(20)
1.4.2 SMA 热敏控制器 .....	(21)
1.4.3 SMA 医用器件 .....	(23)
1.4.4 SMA 人造卫星折叠式展开天线 .....	(24)
2 SMA 的本构关系模型 .....	(25)
2.1 Tanaka 本构关系模型 .....	(26)
2.2 Liang & Rogers 本构关系模型 .....	(27)
2.3 Brinson 本构关系模型 .....	(29)
2.4 SMA 速率相关型本构关系模型 .....	(30)
2.4.1 SMA 丝的超弹性性能试验 .....	(31)
2.4.2 SMA 速率相关型超弹性本构关系模型—修正 Liang 模型 .....	(42)
2.4.3 SMA 速率相关型超弹性本构关系模型—神经 网络模型 .....	(51)
3 NiTi 形状记忆合金应变感知特性研究 .....	(59)

3.1	SMA 丝应变自感知特性试验研究	(59)
3.1.1	试验过程	(59)
3.1.2	试验结果与分析	(61)
3.2	SMA 位移传感器基本特性	(62)
3.2.1	灵敏度系数	(63)
3.2.2	线性度	(65)
3.2.3	滞后	(66)
3.2.4	重复性	(67)
3.2.5	精确度	(68)
4	SMA 阻尼器/位移传感器设计	(70)
4.1	SMA 阻尼器/位移传感器工作原理	(70)
4.1.1	拉伸型 SMA 阻尼器/位移传感器(TSDD)	(71)
4.1.2	剪刀型 SMA 阻尼器/位移传感器(SSDD)	(73)
4.2	SMA 阻尼器/位移传感器的恢复力模型及 参数分析	(75)
4.2.1	TSDD 和 SSDD 的恢复力模型	(76)
4.2.2	TSDD 和 SSDD 的等价刚度和等价阻尼比	(78)
4.2.3	TSDD 和 SSDD 的性能分析与比较	(80)
5	结构地震反应监测与控制一体化 SMA 智能系统	(85)
5.1	结构地震反应监测与控制一体化 SMA 智能系统 振动台试验研究	(85)
5.1.1	结构模型及其参数	(85)
5.1.2	SMA 阻尼器及其参数	(86)
5.1.3	试验系统	(89)
5.1.4	地震动输入	(90)
5.2	振动台试验结果及分析	(91)
5.2.1	TSDD 和 SSDD 的控制效果分析	(91)
5.2.2	TSDD 和 SSDD 位移测量结果	(100)
5.2.3	SMA 阻尼器/位移传感器控制结构地震反应的 仿真分析	(102)

5.3 基于时频分析的 SMA 耗能减震体系非线性特性 识别初探 .....	(108)
5.3.1 小波及小波脊理论 .....	(109)
5.3.2 SMA 耗能减振体系瞬时频率分析与 非线性损伤识别 .....	(110)
6 结构完备状态响应估计与非线性滞变模型的 扩展卡尔曼滤波 - 小波识别方法 .....	(114)
6.1 基于小波多分辨率分析的非线性动力系统 识别方法 .....	(115)
6.1.1 小波多分辨率分析 .....	(116)
6.1.2 基于小波多分辨率分析的非线性动力系统 识别方法 .....	(117)
6.2 结构完备状态估计与非线性滞变模型 扩展卡尔曼滤波 - 小波识别方法 .....	(120)
6.2.1 结构完备状态估计与非线性滞变模型 扩展卡尔曼滤波 - 小波识别方法 .....	(121)
6.2.2 扩展卡尔曼滤波 - 小波识别方法的 精度指标 .....	(125)
6.3 结构双线性滞变模型及其状态响应估计 .....	(127)
6.3.1 结构底层为薄弱层 .....	(128)
6.3.2 结构顶层为薄弱层 .....	(133)
6.4 退化三折线模型识别及状态响应估计 .....	(137)
6.5 安装 SMA 阻尼器的结构状态估计及模型识别 .....	(141)
参考文献 .....	(148)



# 1 形状记忆合金(SMA)及其智能系统的发展概况

乍听起来,金属具有记忆能力不可思议,然而科学家确已获得了这种金属。

早在1932年lander就在Au-Cd合金中发现了形状记忆效应(Shape Memory Effect, SME),但当时并没有得到足够的重视。直到1963年,美国海军武器实验室在等原子比NiTi合金中发现了形状记忆效应后,形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)的研究和应用才引起了人们广泛的兴趣<sup>[1]</sup>。

形状记忆合金具有形状记忆和大应变超弹性两个奇特的、与其他金属材料迥然不同的特性。形状记忆效应是指材料在高温下定形后,冷却至低温(或室温)并施加变形使其存在残余变形,然后加热到一定温度时仍然恢复到变形前原始形状的能力。这种只能记住高温或低温状态形状的效应称为单程形状记忆。如果材料具有重复记住高低温两种状态形状的能力,则称为双程形状记忆。形状记忆合金就是因其形状记忆效应而得名的。超弹性特性是指材料在加载时产生远大于其弹性极限的应变,在卸载时这种应变又可自动恢复的能力。形状记忆合金的超弹性可恢复应变为6%~8%,远高于其他金属材料。

形状记忆合金因其独特而优异的形状记忆效应和超弹性效应使得其研究与应用发展十分迅速。由形状记忆合金制作的器件和系统已经广泛地应用于航空航天、仪器仪表、自动控制、能源、机器人、医学和土木工程等领域。

形状记忆合金的形状记忆效应能产生高达700MPa的驱动力。形状记忆合金作为温度调节的驱动材料,目前主要利用材料

本身电阻加热,因此调节能耗大、反应速度慢,还不能很好地适应结构振动的主动控制要求。但是,利用形状记忆合金的超弹性特性——大应变循环下的滞回耗能特性,目前发展了结构隔震和被动耗能减振多种装置<sup>[2,3,4,5]</sup>。

近年来,随着智能结构系统的兴起和发展,形状记忆合金机敏结构的研究发展十分迅速。例如,将形状记忆合金丝材或颗粒与其他基体材料(高分子材料或金属材料)复合制作的构件和结构不仅具有增强、增韧、抗冲击的良好物理力学性能,同时具有自感知裂纹萌生和主动控制裂纹发展的智能特性,从而展示了形状记忆合金机敏结构在航空航天领域和微电子机械领域广阔的应用前景。欧进萍和关新春(1999)提出了结构损伤应急控制的设想。Li和Li(2002)将形状记忆合金筋预埋在钢筋混凝土中,利用形状记忆合金的形状记忆效应和受限回复产生的驱动力,研究了钢筋混凝土结构渐变损伤的智能控制。

在发展形状记忆合金机敏结构系统的同时,1984年 Webster 发现的磁致形状记忆合金的研究备受关注(Hayashi et al., 2000; Heczko et al., 2001)。磁致形状记忆合金与传统的形状记忆合金相比,其相变的发生既可以由热诱发,也可以由磁诱发。由于诱发相变是在瞬间产生的,因此,磁致形状记忆合金在保留了形状记忆合金大变形、大驱动力和感知功能优点的同时,还具有反应迅速、响应频率高的优点,有望突破形状记忆合金的驱动响应慢而不能实现结构主动振动控制的瓶颈。磁致形状记忆合金具有两种形式:一种是某些合金本身就具有磁致形状记忆效应,如 Ni<sub>2</sub>MnGa 合金就是兼具强磁性、形状记忆效应和大磁致伸缩效应等多种功能特性的新型功能材料;另一种是将形状记忆合金薄膜与磁致伸缩材料或压电陶瓷材料复合而形成的智能复合材料结构,这种智能复合材料结构通过磁诱发相变或电诱发相变,可以大大提高形状记忆合金响应频率,同时也保留了形状记忆合金大变形、大驱动力的优点。

本章首先将系统阐述 SMA 材料的多功能特性;然后介绍土木

工程中的 SMA 驱动器和阻尼器研究现状;最后,介绍 SMA 智能结构系统以及其他领域目前开发的 SMA 器件。

## 1.1 SMA 的基本特性

### 1.1.1 SMA 的形状记忆效应

形状记忆效应是由于合金中发生了热弹性或应力诱发马氏体相变。在许多形状记忆合金系中存在两种不同的结构状态,高温时称之为奥氏体相,是一种体心立方晶体结构的 CsCl 相(又称 B2);而低温时称之为马氏体相(M),是一种低对称性的单斜晶体结构。合金成分的改变可以使马氏体形成和消失的温度在 173 ~ 373K 范围内变化。对于 Ti - Ni 系来说,B2 到马氏体相之间还存在一个很重要的 R 相,它具有菱形晶体结构<sup>[6]</sup>。

这类相变具有热滞效应,如图 1-1 所示。图中四个相变特征温度分别为马氏体相变开始温度  $M_s$ 、结束温度  $M_f$ 、奥氏体相变(也称马氏体逆相变)开始温度  $A_s$  和结束温度  $A_f$ 。相应的晶体结构变化在图中标出。热滞回线间的热滞大小一般为 20 ~ 40K。

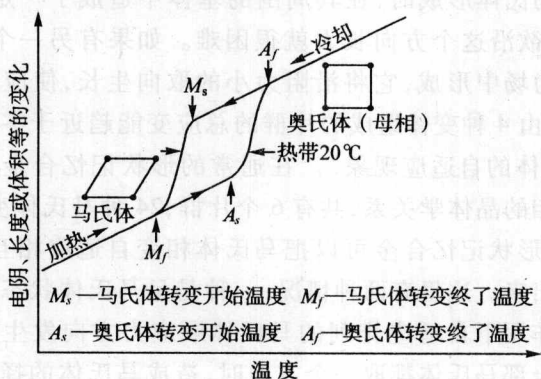


图 1-1 形状记忆合金在冷—热循环过程中呈现的热滞现象

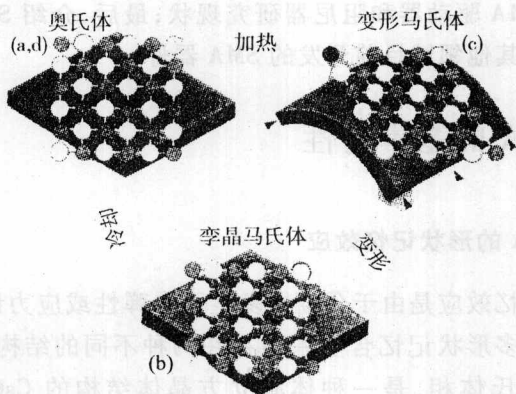


图 1-2 形状记忆效应的微结构变化过程

图 1-2 说明形状记忆效应的微观机理。当母相奥氏体冷却到低于温度时,即转变成马氏体。通过多晶和单晶 Cu - Zn 合金实验发现,相变时,马氏体常围绕母相的一个特定位置形成 4 种变体,合称为“马氏体片群”。变体的惯习面以这一特定位置相对称排列。在光学显微镜下采用偏振光观察,每个马氏体片群具有 4 种不同颜色,这表征各个变体的位相不同。之所以形成这种结构,是因为每片马氏体形成时,在其周围的基体中造成了一定方向的应力场,变体欲沿这个方向长大就很困难。如果有另一个马氏体变体在此应力场中形成,它将沿阻力小的取向生长,使应变能降低。宏观上看,由 4 种变体组成的片群的总应变能趋近于零,此即称为“马氏体变体的自适应现象”。在通常的形状记忆合金中,根据马氏体与母相的晶体学关系,共有 6 个片群,24 种马氏体变体。在外力作用下,形状记忆合金可以把马氏体相变自适应相互抵消的变形量提供出来。这里有两种情况:一种是呈马氏体状态的试样,在单向外力作用下自适应排列的马氏体顺应力方向发生再取向,当大部分或全部马氏体都取一个方向时,造成马氏体的择优取向,整个试样呈现明显的形变;另一种是呈母相状态的试样,在单向外力作用下能诱发马氏体相变,所生成的马氏体都顺应力方向作择优

取向,整个试样也会呈现明显的形变。马氏体择优取向是通过孪生和界面移动实现的。这种变体的择优生长称为马氏体再取向过程。当加热时,在  $A_1$  和  $A_f$  之间,马氏体发生逆相变。由于马氏体晶体的低对称性,因此在逆相变时马氏体中只形成几个母相的等效晶体位相,有时只形成一个母相的原来位相。当母相为长程有序时,形成单一母相原来位相的倾向更大,使马氏体完全回复了母相的晶体,宏观变形也就完全回复。其过程如图 1-3 所示。基于这种机理,形状记忆合金能够记忆各种赋予它的形状,在外界温度变化时,产生形状记忆功能。

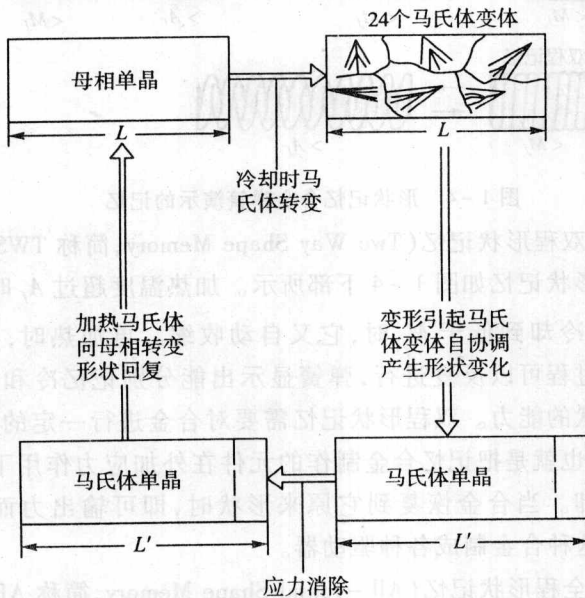


图 1-3 形状记忆效应的原理示意图

根据不同的记忆功能,形状记忆合金可分为单程、双程、全程记忆效应和伪弹性等。

### 1.1.1.1 单程形状记忆(One Way Shape Memory, 简称 OWSM)

单程形状记忆只在加热到  $A_f$  以上,马氏体逆相变成奥氏体,发生形状回复的现象,显示出记忆原来形状的能力。如图 1-4 上部

所示,在低于  $M_f$  时把压紧弹簧拉长;当将其加热到  $A_f$  以上时,弹簧就会收缩到原来的形状;当弹簧温度再次冷却到低于  $M_f$  时,压紧螺旋弹簧并不改变形状。它通常用于一次性抱合和连接的紧固件、连接件和密封垫。在低温时把需要连接的部件配合在一起,温度升高到时就就会记忆原来的形状把它们牢牢地抱合在一起。这种连接可靠、牢固,适用于空间很小、常规情况下难以连接地地方,操作时也省时省工。

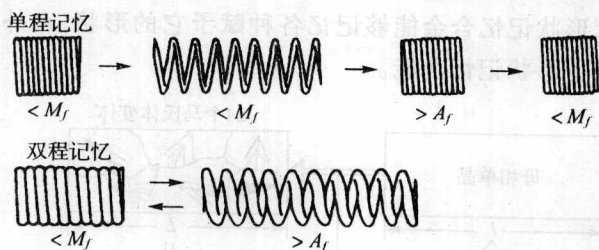


图 1-4 形状记忆合金弹簧演示的记忆

### 1.1.1.2 双程形状记忆(Two Way Shape Memory, 简称 TWSM)

双程形状记忆如图 1-4 下部所示。加热温度超过  $A_f$  时,压紧弹簧伸长;冷却到低于  $M_f$  时,它又自动收缩。再加热时,再次伸长。这个过程可以反复进行,弹簧显示出能分别记忆冷和热状态下原有形状的能力。双程形状记忆需要对合金进行一定的训练后才能得到,也就是把记忆合金制作的元件在外加应力作用下,反复加热和冷却。当合金恢复到它原来形状时,即可输出力而做功。通常可用这种合金制成各种驱动器。

### 1.1.1.3 全程形状记忆(All-round Shape Memory, 简称 ARSM)

富 Ni 的 Ni-Ti 合金经约束时效就会出现一种反常记忆效应,其本质与上述双程形状记忆效应相类似,但是变形更明显强烈,如图 1-5 所示。合金首先在 1273K、1h 固溶处理,然后在奥氏体相将合金约束成图 1-5(a)中的形状,当它冷却时就会成图 1-5(b)和图 1-5(c)的形状。继续冷却,形状又会向反方向变形,如图 1-5(d)和图 1-5(e)。如果再加热至  $A_f$  以上,便会恢复到图 1-5

(a)中的原样。由于这种相反方向的变形均能恢复到原形,故称为全程形状记忆。值得注意的是,只有含 Ni 量不小于 50.5% (原子)的合金且又经过时效,才能具有这种效应。因为时效析出的是透镜状的  $Ti_3Ni_4$  沉淀相表面生成,同时  $M$  相(包括  $R$  相)将沿沉淀相的方向择优形成,使得内外层分别发生不同取向的马氏体相变。所以冷却循环过程中,试样内外层分别发生不同取向的可逆相变,导致全程形状记忆效应的出现。



图 1-5 Ti-51Ni(%原子)合金呈现出的全程形状记忆

### 1.1.2 SMA 的超弹性特性

上面讲的是热—机作用下的形状记忆效应,这种效应需在特征温度反复冷、热才能引发出来。现在来考虑另一种形状记忆,它不取决于温度而取决于外加应力,称为超弹性或伪弹性。

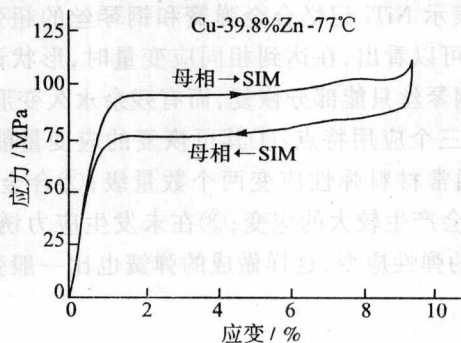


图 1-6 CuZn 合金应力诱发马氏体相变呈现的伪弹性行为



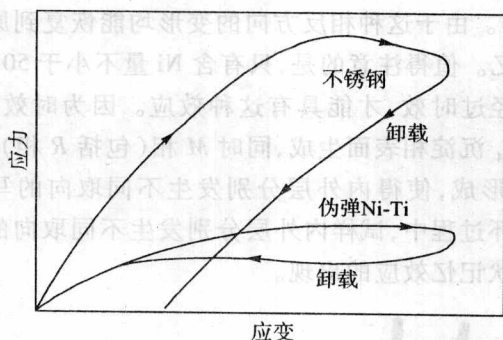


图 1-7 NiTi 形状记忆合金弹簧和钢琴丝的弹性行为比较

冷却时,在无应力条件下马氏体在  $M_s$  开始形成。若施加应力,马氏体可以在  $M_s$  以上温度形成,这种马氏体称为应力诱发马氏体(Stress-Induced Martensite,简称 SIM)。它的相变驱动力不是热能而是机械能。当材料处于  $M_s \sim M_d$  温度范围内发生变形,就会产生超弹性,类似橡胶。 $M_d$  是应力诱发马氏体相变的终了温度。在  $M_s \sim M_d$  间外加应力,可以保持马氏体稳定,但应力一旦消除,马氏体就变得不稳定。图 1-6 表示超弹性的应力-应变曲线。曲线上部平台对应于应力作用下形成的马氏体,而曲线下部平台对应于应力消除时的马氏体可逆相变。它们的可恢复应变量达到 10% 以上。超弹性也可以称之为机械形状记忆效应。

图 1-7 表示 NiTi 记忆合金弹簧和钢琴丝的超弹性曲线。比较两者的特点可以看出,在达到相同应变量时,形状记忆合金可以完全恢复,而钢琴丝只能部分恢复,而有残余永久变形。

超弹性有三个应用特点:①其可恢复的应变量能达到 10% 以上,几乎高出通常材料弹性应变两个数量级;②合金显示恒弹性,在应力恒定时会产生较大的应变;③在未发生应力诱发相变前,合金就具有 2% 的弹性应变,这样做成的弹簧也比一般弹簧性能好得多。

### 1.1.3 SMA 的其他特性

形状记忆合金除了具有形状记忆效应(驱动特性)、超弹性特



性之外,还具有感知特性、高阻尼性能以及弹性模量的动态变化等特性。

文献[7]的研究结果表明,形状记忆合金的马氏体相和  $R$  相与母相相比具有较高的阻尼特性。在  $M \leftarrow \rightarrow A$ ,  $M \leftarrow \rightarrow R$ ,  $R \leftarrow \rightarrow A$  的相变区间具有很高的阻尼性能,原因有两个主要方面:热弹性相变时相界面的移动和应力诱发相变时马氏体变体的转动。

文献[8]采用动态力学性能分析仪(Dynamic Mechanical Analyser, DMA)研究了随着温度变化 NiTi 丝弹性模量的动态变化。研究表明在相变点附近弹性模量存在一个极小值,而且在动态变化过程中奥氏体的弹性模量只比马氏体的稍高一点。而一般认为在静态测量时,奥氏体的弹性模量是马氏体的 3~4 倍。

## 1.2 土木工程中的 SMA 阻尼器和驱动器

SMA 在土木工程中的应用始于 20 世纪 90 年代,概括起来分为三类:第一类是被动阻尼器;第二类是主动驱动器;第三类是智能控制系统。第一类利用 SMA 的超弹性特性,材料可以处于拉伸受力状态,也可以处于剪切受力状态;第二类利用 SMA 的形状记忆效应或 SMA 在马氏体和奥氏体状态下弹性模量的差别,一般材料处于拉伸状态;第三类则同时利用 SMA 的形状记忆效应和应变感知特性。本节详细阐述土木工程结构 SMA 阻尼器与驱动器的研究现状,下一节将详细阐述 SMA 智能系统的研究与应用。

### 1.2.1 SMA 阻尼器

SMA 被动阻尼器主要利用 SMA 材料的阻尼特性来减小结构的动力反应及变形,主要有以下两种构造形式:基础隔振装置和耗能器。SMA 基础隔振装置安装在基础与上部结构之间,耗散地震传递给上部结构的能量,并随装置的变形水平提供不同的刚度,防止上部结构损坏,而且地震后装置可回复到初始状态,无残余变形。隔振装置中常采用具有超弹性特性的奥氏体 SMA 材料。SMA