

形状记忆合金 智能结构

闫晓军 张小勇 著



科学出版社

形状记忆合金智能结构

闫晓军 张小勇 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以航空航天领域的结构设计需求为背景,通过开展设计需求分析、结构方案设计、材料性能测试、本构模型表征、驱动器设计、结构设计及优化、试验测试与验证、产品工程化等环节,提出和发展了针对形状记忆合金智能结构较完整的基础理论、设计方法及研制流程;同时,给出了形状记忆合金智能结构的工程应用实例,以期进一步推动形状记忆合金智能结构的工程应用。

本书可作为高等学校航空航天、力学、机械、材料等相关专业的教学用书,也可供相关领域结构设计及科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

形状记忆合金智能结构 / 张同军, 张小勇著. —北京: 科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-042871-1

I. ①形… II. ①张… ②张… III. ①航空材料-形状记忆合金-智能结构

IV. ①V53.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第308868号

责任编辑: 裴育 王 苏 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年1月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2015年1月第一次印刷 印张: 17 3/4 插页: 1

字数: 344 000

定价: 98.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

形状记忆合金在环境温度变化时会发生内部材料相变,引起明显的形状变化,具有“形状记忆”和其他优良的物理性能。在结构中使用形状记忆合金,通过合理设计可以使结构主动、自适应地改变几何、刚度、连接、阻尼等特性,实现“智能化”。常见的形状记忆合金有 NiTi 合金、CuZnAl 合金、CuAlNi 合金等。本书选择综合性能优异的镍钛(NiTi)合金开展相关研究和应用。

本书以航空航天领域的结构设计需求为背景,通过开展设计需求分析、结构方案设计、材料性能测试、本构模型表征、驱动器设计、结构设计及优化、试验测试与验证、产品工程化等环节,提出和发展了针对形状记忆合金智能结构较完整的基础理论、设计方法及研制流程;同时,给出了形状记忆合金智能结构的工程应用实例,包括作者及课题组研制的系列化形状记忆合金航天压紧释放机构、形状记忆合金航天锁紧机构、主动变刚度的转子支承结构、拟橡胶金属减振器、形状记忆合金主动阻止裂纹扩展结构、形状记忆合金均载螺栓等智能结构,以期进一步推动形状记忆合金智能结构的工程应用。

本书的基础研究工作得到了教育部全国优秀博士学位论文作者专项资金(200351)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0178)、国家自然科学基金(11272025)的资助;工程预研和型号研制工作得到了北京空间飞行器总体设计部、北京控制工程研究所、北京遥测技术研究所、上海航天电子有限公司、中国航空动力机械研究所等单位的资助和支持。在此表示感谢!

感谢课题组的开创者聂景旭教授,他活跃的学术思想和严谨的科研作风,为课题组在智能结构方面的研究奠定了基础。感谢航天五院的赵坚城研究员、刘立平研究员、从强研究员、刘志全研究员、杨巧龙高工、张绍卫高工、刘颖工程师、王睨工程师,上海航天电子有限公司的沈纪政工程师、张连兴高工,北京遥测技术研究所的李凉海研究员、王卫兵高工等在形状记忆合金智能结构研制过程中,长期给予的指导和帮助。

课题组的博士、硕士研究生参加了本书文字、图片、资料的收集工作。感谢黄大伟博士,杨宝锋、秦晓宇、白海波硕士的辛勤付出。

形状记忆合金智能结构涉及多个学科和领域的知识交叉,限于作者的知识范围和水平,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

作 者
2014 年秋

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 智能结构	1
1.1.1 结构衍变历史	1
1.1.2 智能材料特点	2
1.1.3 智能结构定义	4
1.2 形状记忆合金	5
1.2.1 宏观力学特性	5
1.2.2 微观相变机制	7
1.2.3 SMA 发展历程	9
1.3 SMA 智能结构	10
1.3.1 定义及分类	10
1.3.2 研制流程	12
1.4 国内外研究现状	15
1.4.1 材料性能测试	15
1.4.2 本构模型表征	18
1.4.3 驱动器设计	22
1.4.4 工程应用	23
1.5 本书内容安排	33
参考文献	34
第 2 章 SMA 材料性能及测试方法	47
2.1 概述	47
2.2 相变温度测试	47
2.2.1 概念及定义	47
2.2.2 测试方法	48
2.2.3 测试实例	50
2.3 基本力学性能测试	52
2.3.1 概念及定义	52
2.3.2 测试方法	54
2.3.3 测试实例	56

2.4	力学性能衰减测试	59
2.4.1	概念及定义	59
2.4.2	测试方法	60
2.4.3	测试实例	61
2.5	热处理工艺	68
2.5.1	消除加工硬化	68
2.5.2	调节相变温度	69
2.5.3	改善力学性能	70
2.5.4	设定初始形状	71
2.6	小结	72
	参考文献	72
第3章	SMA 本构模型	73
3.1	概述	73
3.2	多相变 SMA 本构模型	73
3.2.1	三维本构模型	73
3.2.2	有限元数值计算及验证	80
3.2.3	一维本构模型	89
3.3	考虑循环衰减的一维本构模型	92
3.3.1	循环衰减特点	92
3.3.2	衰减控制方程	96
3.3.3	算例及验证	97
3.4	拟温度法	101
3.4.1	拟温度法原理	101
3.4.2	拟温度法算例	103
3.5	折线型超弹性本构模型	105
3.5.1	折线型模型	106
3.5.2	等价线性化分析	107
3.5.3	单自由度系统算例	108
3.6	小结	109
	参考文献	109
	附录 符号对照表	112
第4章	SMA 驱动器设计理论与方法	116
4.1	概述	116
4.2	驱动器分类及特点	116
4.2.1	恒定载荷驱动器	117
4.2.2	线性变载荷驱动器	117

4.2.3 突变载荷驱动器	118
4.2.4 不同运动输出的驱动器	119
4.3 驱动器的性能设计	121
4.3.1 恒定载荷驱动器	121
4.3.2 线性变载荷驱动器	124
4.3.3 突变载荷驱动器	129
4.4 驱动器的寿命预测	132
4.4.1 失效过程分析	133
4.4.2 寿命预测模型	134
4.4.3 试验验证	138
4.5 小结	142
参考文献	142
第5章 SMA 航天压紧释放机构	145
5.1 概述	145
5.2 挂钩式压紧释放机构 SMA-100	145
5.2.1 设计需求分析	145
5.2.2 结构方案设计	146
5.2.3 驱动器设计	146
5.2.4 试验测试与验证	147
5.3 分瓣螺母压紧释放机构 SMA-3600	150
5.3.1 设计需求分析	150
5.3.2 结构方案设计	151
5.3.3 驱动器设计	153
5.3.4 试验测试与验证	154
5.4 二级触发压紧释放机构 SMA-10000	158
5.4.1 设计需求分析	158
5.4.2 结构方案设计	158
5.4.3 驱动器设计	160
5.4.4 试验测试与验证	161
5.5 分组滚棒压紧释放机构 SMA-30000	168
5.5.1 设计需求分析	168
5.5.2 结构方案设计	168
5.5.3 驱动器设计	170
5.5.4 试验测试与验证	171
5.6 小结	175
参考文献	175

第 6 章 SMA 航天锁紧机构	177
6.1 概述	177
6.2 SMA 磁悬浮飞轮锁紧机构	177
6.2.1 设计需求分析	177
6.2.2 结构方案设计	178
6.2.3 驱动器设计	179
6.2.4 试验测试与验证	180
6.3 SMA 馈源锁紧机构	185
6.3.1 设计需求分析	185
6.3.2 结构方案设计	185
6.3.3 驱动器设计	186
6.3.4 试验测试与验证	187
6.4 SMA 电机	190
6.4.1 设计需求分析	190
6.4.2 结构方案设计	191
6.4.3 驱动器设计	192
6.4.4 试验测试与验证	194
6.5 小结	196
参考文献	197
第 7 章 SMA 减振结构	199
7.1 概述	199
7.2 主动变刚度的转子支承结构	199
7.2.1 设计需求分析	199
7.2.2 结构方案设计	200
7.2.3 驱动器设计	204
7.2.4 试验测试与验证	205
7.3 拟橡胶金属减振器	210
7.3.1 拟橡胶金属元件	211
7.3.2 减振器结构	215
7.3.3 减振器性能试验	215
7.3.4 其他 SMA 阻尼减振结构	220
7.4 考虑预应力的大阻尼减振器设计	223
7.4.1 预压缩对 SMA 减振器特性的影响	225
7.4.2 考虑预压缩、预拉伸影响的减振器设计	229
7.5 小结	232
参考文献	233

第 8 章 SMA 强度自适应结构	234
8.1 概述	234
8.2 主动阻止裂纹扩展结构	234
8.2.1 工作原理	234
8.2.2 结构制作	236
8.2.3 结构方案设计	237
8.2.4 试验测试与验证	242
8.3 均载螺栓	249
8.3.1 工作原理	250
8.3.2 结构方案设计	252
8.3.3 试验测试与验证	254
8.4 小结	259
参考文献	259
第 9 章 总结	261
9.1 研制流程总结	261
9.2 未来发展趋势	270
参考文献	271

第 1 章 绪 论

1.1 智能结构

结构是反映有形物体或无形认知等相互之间关系的概念。结构本身可以由一个或多个物体组成,如机械结构、建筑结构等;也可以是一种属性,如社会结构、数据结构等^[1,2]。本书的结构是指由单个或者多个物体组成,能够维持自身形状,并具有一定刚度、阻尼和承载能力的装配体。

按照来源不同,结构可以划分为天然结构和人造结构。天然结构广泛存在于自然界中,如岩石、地壳、植物和动物的组成部分等;人造结构是人类在自然界物体的基础上发明和制造的,如石器、机械、电子产品等。

1.1.1 结构衍变历史

天然结构,尤其是生物体相关的结构,在大自然的长期进化和衍变过程中,形成了经过优化、高效的组织形式,使结构不单具有传统的刚度、承力、支撑功能,还能够根据外界环境的变化,自我传感、思考、驱动,以改变自身的状态,适应外界环境,具有智能化的特征。例如,人类的皮肤(图 1.1),它本身集多种传感、驱动功能为一身,不仅作为人体的保护结构,还具有温度、湿度、压力等传感功能,能驱动毛孔、汗毛、汗腺等的运动,实现人体温度调节。再如,蚕茧(图 1.2)是非常轻质的多孔结构,其内部结构优化、高效,不仅透气性好,还有一定的阻尼,能够消耗一定的外界攻击能量,保护蚕蛹免受伤害。

人造结构随着人类历史发展,其“智能化”程度也在不断提高(图 1.3)。在石器时代,人类直接使用石材、骨头等天然材料,通过简单打磨,制造出的结构形状简单、功能单一;青铜器时代,铜被发现并用于铸造结构,青铜器外形精致,功能多样;铁器时代,人类掌握了铁的冶炼和制造技术,结构的强度进一步提高,形状进一步优化;蒸汽时代,随着蒸汽机的发明,结构有了动力源,变成了“活”的结构;电气时代,随着内燃机、电机等更多动力源

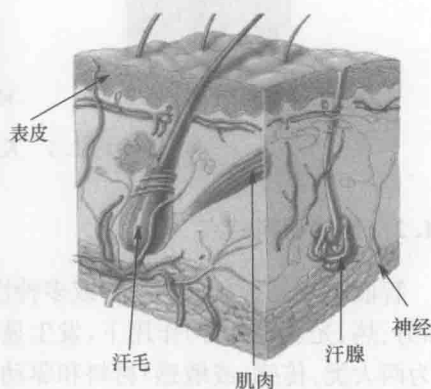


图 1.1 人类皮肤结构

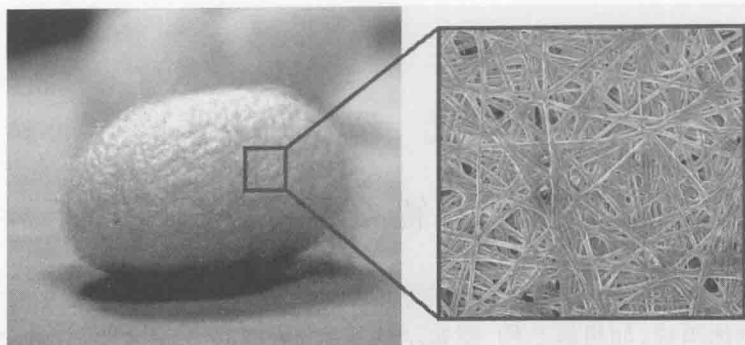


图 1.2 蚕茧

的出现和自控技术的快速发展,结构不仅能够“活”动,而且具备自我控制能力;当前所处的信息时代,随着计算机的发明和普及、微纳米加工技术的发展、新型微传感器与驱动器的出现,结构能够自我思考、传感、驱动,更加趋近于自然界中的生命体。从图 1.3 可以看出,随着人类文明从石器时代发展到现在的信息时代,人造结构的形式越来越精巧,功能越来越多样化,“智能化”程度越来越高。



图 1.3 人造结构衍变历史

1.1.2 智能材料特点

智能材料是指材料的一种或多种性质(如阻尼、刚度、形状、电阻等)会在激励(如力、热、光、电、磁等)作用下,发生显著变化^[3]。根据用途不同,智能材料通常可分为两大类:传感(或敏感)材料和驱动材料。

传感材料是指对来自外界或内部的刺激强度及变化具有感知能力,并能以电

流、电压、磁场、光等信号进行反馈的材料。这类材料可以用于结构中,实现传感功能。常见的传感材料有光纤、热敏材料、变形敏感材料等。利用传感材料可以制作传感器。传感器是一种能感受指定的被测量,并输出信号的器件或装置^[4]。

驱动材料可以根据温度、电场或磁场等的变化来改变自身的颜色、形状、尺寸、位置、刚性、阻尼、相位、内耗等性能,可用在结构中,实现驱动功能。常见的驱动材料有形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)、压电材料、电流变材料等。利用驱动材料可以制作驱动器,驱动器是一种将能量(如电能、液压、气压、电磁等)转换为运动或力输出的装置,通常用于结构或系统的移动或控制^[5]。

在结构中选用智能材料驱动时,评价其性能的关键指标有驱动应力和应变、能量密度、驱动频率等^[6]。图 1.4 为常用智能材料驱动应力、应变及体积能量密度(单位体积中的能量)的对比。图 1.5 为能量密度(单位质量中的能量)及驱动频率的对比。可以看出,在现有智能材料中,SMA 的能量密度最高,同时也具有较高的

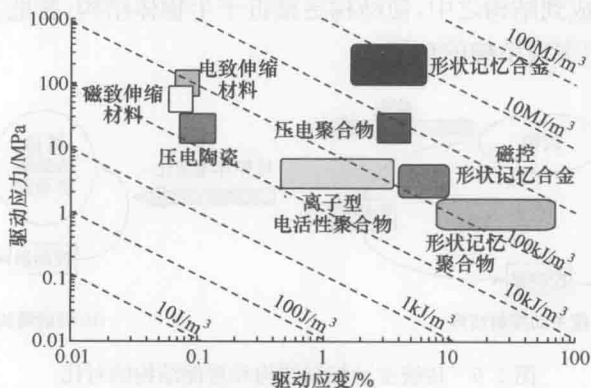


图 1.4 常用智能材料驱动应力、应变及体积能量密度对比^[6]

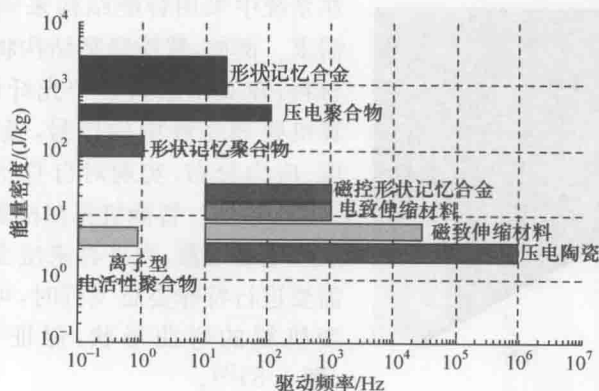


图 1.5 常用智能材料能量密度及驱动频率对比^[6]

驱动频率、较大的输出应力和应变,综合性能突出,是一种在工程中易于推广使用的智能材料。

1.1.3 智能结构定义

智能结构是在结构中集成智能材料作为传感器和(或)驱动器,使结构除了具有承载、传力、连接等功能外,还具有感知自身状态(温度、压力、速度等)、改变自身性质(刚度、阻尼、形状等)等功能,以更好地适应外界环境的变化,实现预定功能的一类结构。

智能结构的最显著特点是结构和传感器、驱动器高度集成,这个特点使智能结构明显区别于传统的具有主动控制功能的结构。如图 1.6 所示,传统的具有主动控制功能的结构一般包含传感器、驱动器、控制器等多个部分,并且传感器、驱动器的界限分明。相比之下,智能结构由于利用了智能材料的固有驱动、传感特性,直接将智能材料集成到结构之中,使结构更接近于生物体结构,智能和自适应特点更明显,能够更好地实现结构的功能。

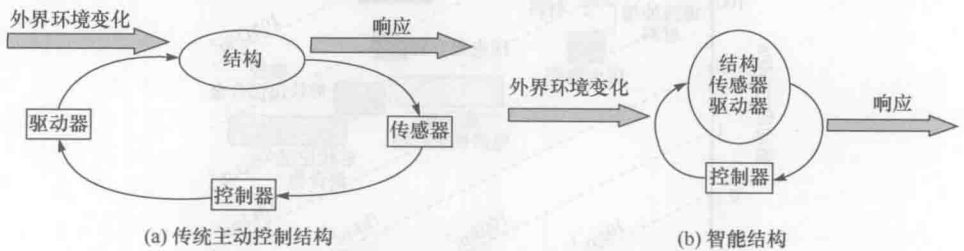


图 1.6 传统主动控制结构和智能结构的对比

在航空航天飞行器、精密仪器等系统中,为了减轻质量,提高智能化程度,往往

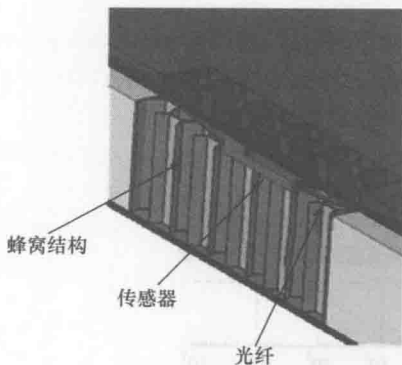
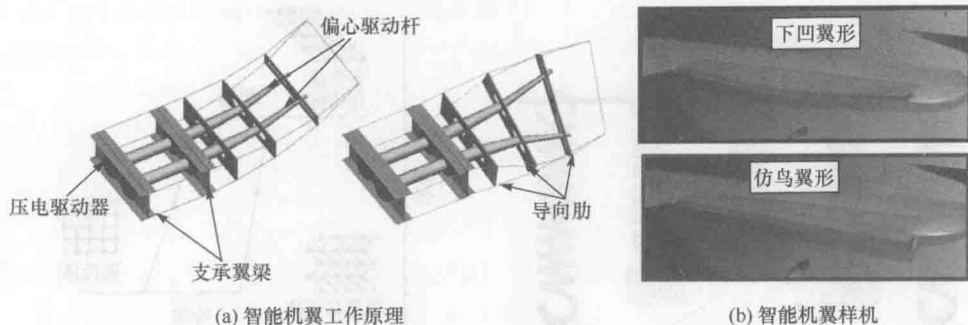


图 1.7 智能蜂窝结构^[7]

在系统中采用智能结构来满足设计和使用需求。例如,智能蜂窝结构将蜂窝作为基体材料,在其中嵌入多个光纤传感器,通过计算机处理光纤中的信号,及时掌握自身温度、应力分布,实现对自身状态的实时监控(图 1.7)^[7]。智能机翼在机翼龙骨结构中集成压电驱动器,当外界来流变化或飞机自身需要进行特殊姿态飞行时,可利用驱动器改变机翼的弯曲形状,保证气动性能最优(图 1.8)^[8]。

图 1.8 美国 Smart Wing 计划发展的智能机翼结构^[8]

1.2 形状记忆合金

形状记忆合金是一类能够“记忆”其初始形状的合金材料,由于同时具有传感和驱动功能,是一种智能材料。SMA 具有两种特殊的宏观力学性能,即形状记忆效应(shape memory effect, SME)和超弹性(super elasticity, SE),都是由其内部的微观相变机制引起的。目前,SMA 已经在工业、医学等领域得到了较为广泛的应用。

1.2.1 宏观力学特性

SMA 重要的宏观力学特性包括:形状记忆效应和超弹性。

形状记忆效应是指 SMA 在环境温度低于其相变温度时,对其加载并卸载,卸载后存在残余应变,此时对 SMA 加热,就可以使残余应变消失,SMA 完全回复到加载前的形状,见图 1.9。

基于形状记忆效应,SMA 可以用来作为驱动器。如图 1.10 所示,用 SMA 制作成弹簧,通过对弹簧反复加热、冷却,弹簧将会反复提升、降低重物,对重物做功。这个过程就是形状记忆效应的一种体现形式,对于这种 SMA 在反复加热、冷却下对恒定负载做功的循环,本书称为形状记忆循环。形状记忆循环下的应变-温度变化曲线如图 1.11 所示。本书第 5~8 章介绍的 SMA 航天压紧释放机构、SMA 航天锁紧机构、主动变刚度的转子支承结构、SMA 主动阻止裂纹扩展结构等都利用了 SMA 的形状记忆效应。



图 1.9 形状记忆效应示意图

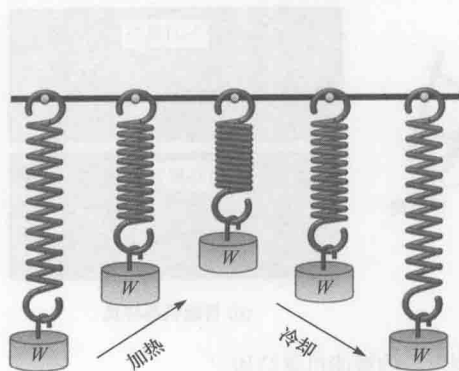


图 1.10 SMA 弹簧的形状记忆循环

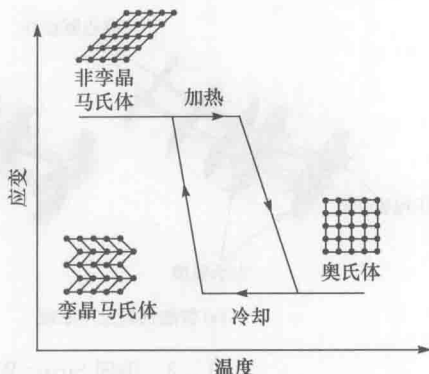


图 1.11 形状记忆循环下的应变-温度曲线

当 SMA 用于驱动器时,通常会设计与之相配合的偏置弹簧(或偏置弹性结构),使其在回复后还能在偏置弹簧作用下重新被拉伸,实现双程驱动,其原理如图 1.12 所示^[9]。这类 SMA 驱动器比较常见,如本书第 5、6 章介绍的 SMA 航天压紧释放机构和 SMA 航天锁紧机构都采用了这样的驱动器。

超弹性是指当 SMA 处于较高环境温度时,对其施加应力使其发生较大变形,当应力释放后,SMA 仍能回复到变形前的初始形状的现象,见图 1.13。

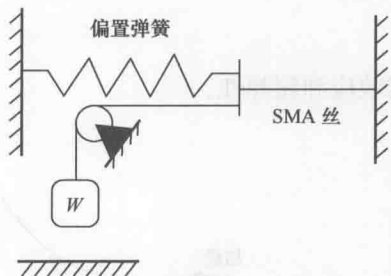


图 1.12 SMA 丝-偏置弹簧驱动器^[9]

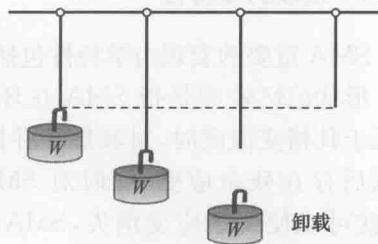


图 1.13 SMA 超弹性示意图

基于超弹性特性,SMA 可用在很多需要大变形或大阻尼的结构中。典型的超弹性如图 1.13 所示,通过重物对超弹性 SMA 丝加载,使 SMA 丝发生较大变形,当取下重物后,SMA 丝会自动回复到其加载前的形状。若反复重复上述过程,对超弹性状态的 SMA 丝进行反复加载及卸载循环,称为超弹性循环。典型的超弹性应力-应变曲线如图 1.14 所示,其应力应变曲线将形成滞回圈,耗散机械加载的能量,因此 SMA 具有良好的阻尼特性。NiTi 合金的比阻尼可达 15%~20%,CuZnAl 合金的比阻尼高达 30%~85%^[10],是优秀的阻尼材料。本书第 7 章介绍的 SMA 拟橡胶金属减振器就是利用了 SMA 的超弹性和大阻尼特性。

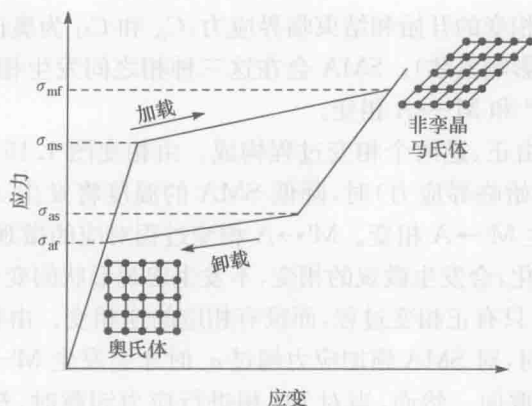


图 1.14 超弹性循环下的应力-应变曲线

当 SMA 用于阻尼减振时,还需具体设计 SMA 的结构形式,进一步增大其阻尼,如本书第 7 章将 SMA 丝缠绕成拟橡胶金属的结构形式。

1.2.2 微观相变机制

SMA 的形状记忆效应、超弹性等宏观力学性能源于其内部晶体的微观相变。如图 1.15 所示, SMA 在不同的应力和温度下,具有奥氏体(用 A 表示)、孪晶马氏体(用 M^l 表示)和非孪晶马氏体(用 M^d 表示)三种相: A 相只在高温区稳定存在, M^l 相只在低温低应力区稳定存在,而 M^d 相在高应力区或低温区稳定存在(图 1.15 中 M_s 、 M_f 、 A_s 、 A_f 分别代表马氏体和奥氏体相变的开始和结束温度; σ_s 、 σ_f

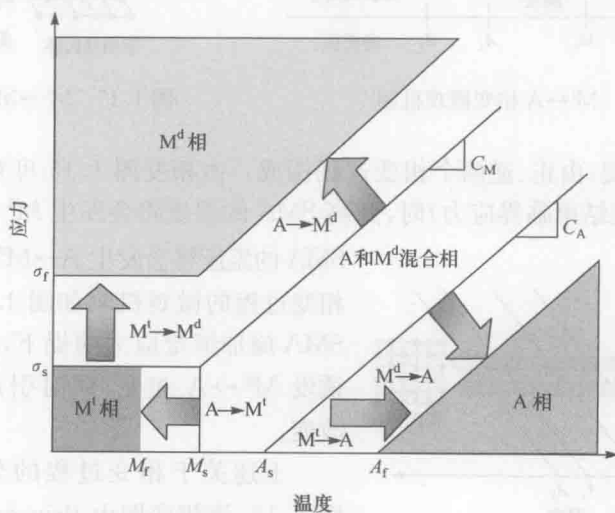


图 1.15 SMA 相变图

为应力诱发马氏体相变的开始和结束临界应力; C_A 和 C_M 为奥氏体相变和马氏体相变过程中的应力影响系数)。SMA 会在这三种相之间发生相变,一共有三类相变: $M' \leftrightarrow A$ 、 $M' \rightarrow M^d$ 和 $M^d \leftrightarrow A$ 相变。

$M' \leftrightarrow A$ 相变:由正、逆两个相变过程构成。由相变图 1.15 可知,在应力低于 σ_s ($M' \rightarrow M^d$ 相变开始临界应力)时,降低 SMA 的温度将发生 $A \rightarrow M'$ 相变;升高 SMA 的温度将发生 $M' \rightarrow A$ 相变。 $M' \leftrightarrow A$ 相变过程对应的微观机制如图 1.16 所示。随着温度的变化,会发生微观的相变,不发生宏观形状的变化。

$M' \rightarrow M^d$ 相变:只有正相变过程,而没有相应的逆相变。由相变图 1.15 可知,相变温度低于 M_s 时,对 SMA 施加应力超过 σ_s 时才会发生 $M' \rightarrow M^d$ 相变,这个过程又称为马氏体重取向。然而,当对 M^d 相进行应力卸载时,却不会发生对应的 $M' \rightarrow M^d$ 的逆相变,因为 M^d 相在低温低应力区也能稳定存在。 $M' \rightarrow M^d$ 相变过程的微观机制如图 1.17 所示,随着对孪晶马氏体加载应力的增大,将引起宏观形状的变化。

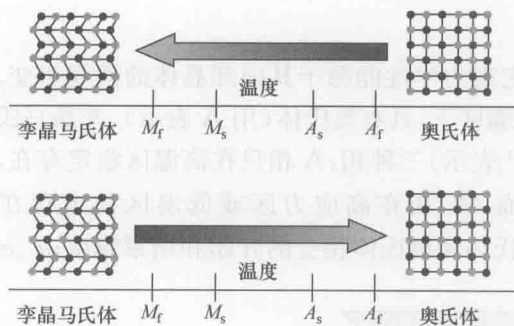


图 1.16 $M' \leftrightarrow A$ 相变微观机制

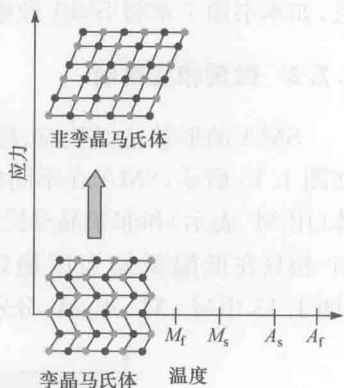


图 1.17 $M' \rightarrow M^d$ 相变微观机制

$M^d \leftrightarrow A$ 相变:由正、逆两个相变过程构成。由相变图 1.15 可知,在应力高于 σ_f ($M' \rightarrow M^d$ 相变结束临界应力)时,升高 SMA 的温度将会发生 $M^d \rightarrow A$ 相变;降低

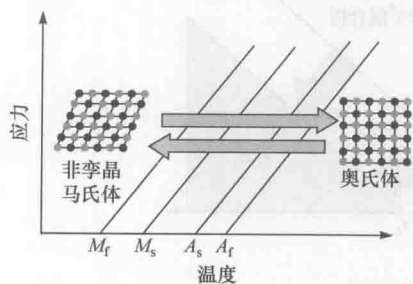


图 1.18 $M^d \leftrightarrow A$ 相变微观机制

SMA 的温度将会发生 $A \rightarrow M^d$ 相变。 $M^d \leftrightarrow A$ 相变过程的微观机制如图 1.18 所示,在对 SMA 施加恒定应力前提下,温度的变化会诱发 $M^d \leftrightarrow A$ 相变,同时引起宏观形状的改变。

上述关于相变过程的分析基于相变图 1.15,该相变图由 Brinson 等提出^[11,12],较完整地表示出了 SMA 的相变行为及对