

基于形状记忆合金的自复位抗震钢结构： 材料、构件与体系

王伟 方成 著

中国建筑工程出版社

责任编辑: 武晓涛 王 梅
封面设计: 七星博纳

Shape memory alloy-based self-centering earthquake-resistant steel structures: materials, members, and systems



建工出版社微信



经销单位: 各地新华书店、建筑书店
网络销售: 本社网址 <http://www.cabp.com.cn>
中国建筑出版在线 <http://www.cabplink.com>
中国建筑书店 <http://www.china-building.com.cn>
本社淘宝天猫商城 <http://zgjzgyCBS.tmall.com>
博库书城 <http://www.bookuu.com>
图书销售分类: 建筑结构与岩土工程 (S10)

ISBN 978-7-112-24126-2



9 787112 241262 >

(34642) 定价: 48.00 元

基于形状记忆合金的自复位抗震钢结构： 材料、构件与体系

王 伟 方 成 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

基于形状记忆合金的自复位抗震钢结构: 材料、构件与体系 / 王伟, 方成著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2019.12
ISBN 978-7-112-24126-2

I. ①基… II. ①王… ②方… III. ①形状记忆合金-抗震结构-钢结构
IV. ①TU352.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 179895 号

为实现韧性城市的建设目标, 首先需要发展抗震韧性结构的关键技术和设计理论, 有效提高强震作用下建筑和基础设施的震后恢复能力。本书以“材料—元件—构件与节点—结构”为主线, 系统地介绍了基于形状记忆合金的自复位抗震钢结构性能和设计方法, 重点突出新型自复位元件应用于结构的工作机理及其设计关键技术。包括: SMA 棒材、环簧、碟簧的加工工艺与基本力学性能; 基于 SMA 棒材的钢结构节点抗震性能与设计; 基于 SMA 环簧的钢结构节点抗震性能与设计; 基于 SMA 环簧的自复位阻尼器抗震性能与设计; 基于 SMA 碟簧的钢结构节点抗震性能与设计; 基于 SMA 的钢—混凝土组合节点抗震性能与设计; 基于 SMA 的自复位钢框架抗震设计与地震损失分析。

本书适合建筑设计人员和工程抗震研究人员阅读, 也可供高校教师从事相关科研和教学工作参考。

责任编辑: 武晓涛 王 梅

责任校对: 王 瑞

基于形状记忆合金的自复位抗震钢结构: 材料、构件与体系

王 伟 方 成 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路9号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京建筑工业出版社制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 14¹/₂ 字数: 362千字

2020年1月第一版 2020年1月第一次印刷

定价: 48.00元

ISBN 978-7-112-24126-2

(34642)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

现代化大型城市人口集中、建筑物和基础设施集中、财富集中、社会功能集中，建筑和基础设施的震后功能恢复速度，对经济、社会乃至人群心理和生活的影响之大，前所未有。因此，建设韧性城市已成为当前及其今后相当长一段时期内土木工程抗震科技工作者面临的重要任务之一，抗震韧性（Seismic resilience）正逐渐成为工程抗震设计的新要求。要实现韧性城市的目标，首先就需要通过发展抗震韧性结构的关键技术和设计理论，有效提高强震作用下建筑和基础设施的震后恢复能力。抗震韧性理念提升了传统以保障地震下生命安全性为主的结构抗震要求，强调减小震后经济损失和避免漫长的震后修复期，最大限度地降低地震灾害对社会的影响，从而获得显著的经济效益和社会效益。

近年来，国内外学者在抗震韧性结构领域开展了诸多研究，提出了可更换结构、自复位结构、摇摆结构等多种形式，其中最具代表性的当属自复位结构。自复位结构体系的核心包括自复位系统和可更换耗能部件，两者组合使用既可以获得优良的延性和耗能能力，又可以使主体结构在地震中无损或仅发生易于修复的微小损伤且震后残余变形极小。后张拉预应力技术无疑是实现自复位系统有效工作的驱动方式之一。随着材料科学与技术的发展，形状记忆合金（SMA）在土木工程抗震中逐渐得到应用，有别于后张拉预应力技术这一传统自复位驱动方式，形状记忆合金的超弹性效应具有同时为自复位结构提供变形回复驱动力和耗能能力的一体化集成优势。基于 SMA 开发的特殊元件和构件还可解决后张拉预应力自复位结构极限变形能力有限且存在断裂风险，构造复杂、张拉施工烦琐等瓶颈问题。

本书作者自 2011 年以来在国内较早开展了基于 SMA 的自复位抗震钢结构研究，从 SMA 材料和元件入手进行系统性研发，先后创制了 SMA 环簧和碟簧等新型自复位元件，将其应用于钢结构连接、节点、构件并拓展至结构体系，具体包括：

- 1) 形状记忆合金棒材、环簧、碟簧的加工工艺与基本力学性能；
- 2) 基于形状记忆合金棒材的钢结构节点抗震性能与设计；
- 3) 基于形状记忆合金环簧的钢结构节点抗震性能与设计；
- 4) 基于形状记忆合金环簧的自复位阻尼器抗震性能与设计；
- 5) 基于形状记忆合金碟簧的钢结构节点抗震性能与设计；
- 6) 基于形状记忆合金的钢 - 混凝土组合节点抗震性能与设计；
- 7) 基于形状记忆合金的自复位钢框架抗震设计与地震损失分析。

本书即是在参考国内外相关研究成果的基础上，对我们在基于 SMA 的自复位抗震钢结构方面的研究成果加以总结而成。全书大纲由我拟定，由方成起草第 1 章，我起草第 2 ~ 9 章，最后由我负责全书的修改和统稿。

本书内容主要基于下列我所指导研究生的学位论文工作，他们是邵红亮、刘佳、贺策、杨肖、张奥、钟秋明、冯伟康、胡书领、陈俊百。方成副教授参与了上述部分研究生

的指导，对本书的研究成果也有贡献。同济大学陈以一教授对相关研究工作多次提出指导意见。研究生冯伟康协助完成了全书文字和图表的排版工作。本书的研究还得到了国家自然科学基金重点国际合作研究项目（批准号：51820105013）、国家自然科学基金面上项目（批准号：51778459，51778456）、国家自然科学基金重点项目（批准号：51038008）、土木工程防灾国家重点实验室基金项目（批准号：SLDRCE14-B-05）、地震工程国际合作联合实验室基金项目（批准号：ILEE-IJRP-P1-P1-2016）、同济大学中央高校基本科研业务费专项资金学科交叉类项目（批准号：0200219232）的资助。对此，本书作者表示衷心感谢。

尽管我们做出了努力，但由于学识和水平有限，书中依然难免存在不当和疏漏之处，恳请读者不吝指正，以期在今后加以改进和完善。

王伟
2019年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景与现状	1
1.1.1 自复位结构与形状记忆合金	1
1.1.2 SMA 材料	1
1.1.3 SMA 基本元件研究进展	3
1.1.4 SMA 构件与装置研究进展	6
1.1.5 基于 SMA 构件的结构体系研究进展	10
1.1.6 研究现状分析	12
1.1.7 研究方向展望	13
1.2 本书内容安排	13
第 2 章 形状记忆合金棒材试验研究	15
2.1 引言	15
2.2 试验方法	15
2.2.1 试件设计	15
2.2.2 试验流程	16
2.2.3 试验结果与参数分析	18
第 3 章 基于形状记忆合金棒材的钢结构节点抗震性能	32
3.1 引言	32
3.2 SMA 棒材节点试验研究	32
3.2.1 试件设计	32
3.2.2 试验流程	38
3.2.3 试验结果	40
3.3 SMA 棒材节点有限元建模	50
3.3.1 建模方法	50
3.3.2 建模结果验证	53
3.4 基于 SMA 棒材的节点性能影响参数分析	54

3.4.1 螺杆预应变的影响	55
3.4.2 螺杆长度的影响	56
3.4.3 角钢厚度的影响	57
3.4.4 节点构造形式的影响	58
3.5 设计建议与方法	60
3.5.1 纯 SMA 螺杆节点设计流程	60
3.5.2 带角钢 SMA 螺杆节点设计流程	63
第 4 章 形状记忆合金环簧试验研究	65
4.1 引言	65
4.2 构造与机理	65
4.3 试验方法	66
4.3.1 试件设计	66
4.3.2 试验流程	67
4.4 试验结果与分析	68
4.4.1 常幅循环加载试验	68
4.4.2 增幅循环加载试验	72
第 5 章 基于形状记忆合金环簧的钢结构节点抗震性能与设计方法	76
5.1 引言	76
5.2 SMA 环簧节点试验研究	76
5.2.1 试件设计	76
5.2.2 试验流程	79
5.2.3 试验结果与分析	82
5.3 SMA 环簧节点有限元建模	88
5.3.1 建模方法	88
5.3.2 建模结果验证	90
5.4 SMA 环簧组节点性能影响参数分析	95
5.4.1 环簧组预紧量的影响	95
5.4.2 内外环接触面摩擦系数的影响	97
5.4.3 外环厚度的影响	98
5.4.4 腹板螺栓预紧力的影响	99
5.4.5 盖板自由段长度与厚度之比的影响	100
5.5 设计建议与方法	101

5.5.1 确定设计目标	101
5.5.2 确定 SMA 外环基本几何参数	102
5.5.3 确定 SMA 外环数量	106
5.5.4 节点其余部件设计	107

第 6 章 基于形状记忆合金环簧的自复位阻尼器抗震性能与设计方法110

6.1 引言	110
6.2 构造与机理	110
6.3 SMA 阻尼器试验研究	112
6.3.1 试件设计	112
6.3.2 试验流程	114
6.3.3 试验结果	117
6.3.4 试验结果分析	122
6.4 SMA 环簧阻尼器滞回模型构建	126
6.4.1 单环加载分析	126
6.4.2 阻尼器分析	129
6.5 基于 SMA 阻尼器的框架设计建议与方法	133
6.5.1 确定性能目标	133
6.5.2 框架设计流程	134
6.5.3 SMA 环簧自复位阻尼器设计流程	135

第 7 章 基于形状记忆合金碟簧的钢结构节点抗震性能与设计方法138

7.1 引言	138
7.2 SMA 碟簧钢结构节点试验研究	138
7.2.1 试件设计	138
7.2.2 试验流程	142
7.2.3 试验结果	145
7.2.4 试验结果对比分析	149
7.3 设计建议与方法	153
7.3.1 确定节点设计目标	153
7.3.2 确定 SMA 螺杆及 SMA 碟簧的基本几何参数	153
7.3.3 确定 SMA 螺杆及 SMA 碟簧的预应变	155
7.3.4 确定 SMA 螺杆长度及 SMA 碟簧相对排列个数	156
7.3.5 SMA 碟簧节点的设计流程	156

第 8 章 基于形状记忆合金的钢 - 混凝土组合节点抗震性能与设计方法.....157

8.1 引言157

8.2 基于 SMA 的组合节点试验研究.....157

8.2.1 试件设计157

8.2.2 试验流程159

8.2.3 试验结果161

8.2.4 试验结果分析166

8.3 基于 SMA 的组合节点有限元模拟172

8.3.1 建模方法172

8.3.2 建模结果验证177

第 9 章 基于形状记忆合金的自复位钢框架抗震设计与地震损失分析182

9.1 引言182

9.2 自复位支撑滞回模型与 OpenSEES 建模182

9.2.1 自复位支撑的滞回模型182

9.2.2 屈曲约束支撑的滞回模型183

9.2.3 OpenSEES 建模183

9.3 屈曲约束支撑与自复位支撑 Benchmark 钢框架设计184

9.3.1 Benchmark 钢框架概述184

9.3.2 Benchmark 抗弯钢框架设计信息185

9.3.3 屈曲约束支撑钢框架设计187

9.3.4 SMA 自复位支撑钢框架设计194

9.3.5 结构设计对比197

9.4 SMA 支撑钢框架的易损性分析197

9.4.1 结构易损性分析方法197

9.4.2 结构易损性分析结果204

9.5 SMA 支撑钢框架的地震经济损失分析209

9.5.1 基于 MCS 的地震经济损失分析方法209

9.5.2 结构震后修复费用与地震经济损失分析结果215

9.5.3 结构总修复费用曲线的敏感性分析216

9.5.4 经济损失金字塔217

参考文献219

第 1 章 绪 论

1.1 背景与现状

1.1.1 自复位结构与形状记忆合金

在结构抗震理论日益完善的当今，地震仍然严重威胁着人类社会的生存和发展。仅按现行抗震规范要求设计的结构，即使在强震作用下没有发生结构整体倒塌，但是由于过大塑性变形导致的破坏和难以恢复的残余变形而不得不在震后予以拆除；即使设法修复也将造成高昂的代价，付出的时间、材料和人力成本甚至会超过重建所需。如 2011 年新西兰 Christchurch 地震后，受灾范围内大量的尚未完全倒塌的建筑由于显著的破坏而需要被拆除，预估重建费用将高达 400 亿新西兰元，占当年新西兰国内生产总值的 20%^[1]。由此可见，“大震不倒”已经不能完全满足现代抗震设计的需要。对于钢结构，能够实现强震作用下的可恢复性目标，即结构大震后不需修复，或者只需对局部受损部件进行快速定位及简易更换便可迅速恢复使用功能，将有效提高广大城镇特别是大型城市的灾后恢复能力，具有显著的社会效益和经济效益^[2]。

近十几年来，抗震研究领域中的一个较为突出的亮点便是基于超弹性形状记忆合金（Shape Memory Alloy，简称 SMA）的自复位结构体系的提出。该理念可以追溯到 20 世纪 90 年代中期开展的 Manside 与 Istech 计划^[3]，研究成果为 SMA 自复位消能减震系统的研制和开发提供了重要基础。在随后的 20 年间，国内外众多学者进行了大量的理论和试验研究，取得了丰硕的成果。目前，相关研究已经从“概念探索的第一阶段”发展到了“实用开发的第二阶段”，其中在第一阶段，研究人员逐渐掌握了 SMA 的基本材性、生产工艺与热处理制度，同时也对部分 SMA 消能减震装置进行了初步的研制与概念验证。从 2005 年开始，研究发展到了“第二阶段”，一系列相关概念产品开始出现，同时研究者也开始更加理性地审视 SMA 的设计理念，寻求最优应用方案。自 2010 年以来，仅美国国家自然科学基金委（NSF）就针对 SMA 抗震应用研究先后资助了总额超过 300 万美元的科研项目，涵盖 SMA 阻尼器开发、钢结构、混凝土结构以及木结构等应用。英国工程与自然科学基金委（EPSRC）也于 2016 年批准了 SMA 在混凝土结构中的应用研究。

1.1.2 SMA 材料

SMA 具有两种主要金相，一种是低温稳定的马氏体相（martensite），另外一种是高温稳定的奥氏体相（austenite），也称母相。奥氏体为规则的体心立方晶体，而马氏体根据晶体排布方式可以分为自协作马氏体（twinned martensite）和非自协作马氏体（detwinned martensite）。SMA 最基本的特征是奥氏体与马氏体之间的可逆相变，这种相变伴随着晶体无扩散切变过程，与传统的金属扩散相变有本质的不同。在零应力状态下 SMA 的相变特

征温度包括：1) 奥氏体起始温度 A_s ，即由马氏体开始向奥氏体转变时的温度；2) 奥氏体结束温度 A_f ，即马氏体完全转变为奥氏体时的温度；3) 马氏体起始温度 M_s ，即由奥氏体开始向马氏体转变时的温度；4) 马氏体结束温度 M_f ，即奥氏体完全转变为马氏体时的温度。

根据相变诱发机理的不同，SMA 会出现形状记忆效应 (shape memory effect) 或超弹性效应 (superelasticity)。形状记忆效应是指变形后的 SMA 在经过一定的热循环后恢复到初始形状的能力。如图 1.1 (a) 所示，SMA 在温度低于 M_f 的情况下受应力作用会从自协作马氏体相转化为非自协作马氏体相，且当应力消失后保持该状态不变，即变形暂时无法恢复。然而，如果将材料升温至 A_f 以上，非自协作马氏体相将转化为奥氏体相，同时促进变形完全恢复。超弹性效应是指 SMA 在一定的恒温范围内可以完全自动恢复应力诱发马氏体相变变形的能力。如图 1.1 (b) 所示，SMA 在高于 A_f 的情况下呈奥氏体相，在应力作用下由奥氏体相转化为非自协作马氏体相。当应力消失时 (即卸载时)，通过逆相变驱动可使高达 8% ~ 10% 的应变瞬时自动恢复，并在上述加卸载循环中形成滞回环从而耗散能量。需要说明的是，当温度在 A_f 和 A_s 之间时也会有一定的超弹性特性，部分变形将得到恢复。SMA 的上述两种特性在土木工程领域皆有应用潜力，但是目前超弹性效应由于其瞬时自复位特性以及无需额外供能 (如供电供热) 等优点在抗震领域，尤其是被动控制领域受到更多的关注。

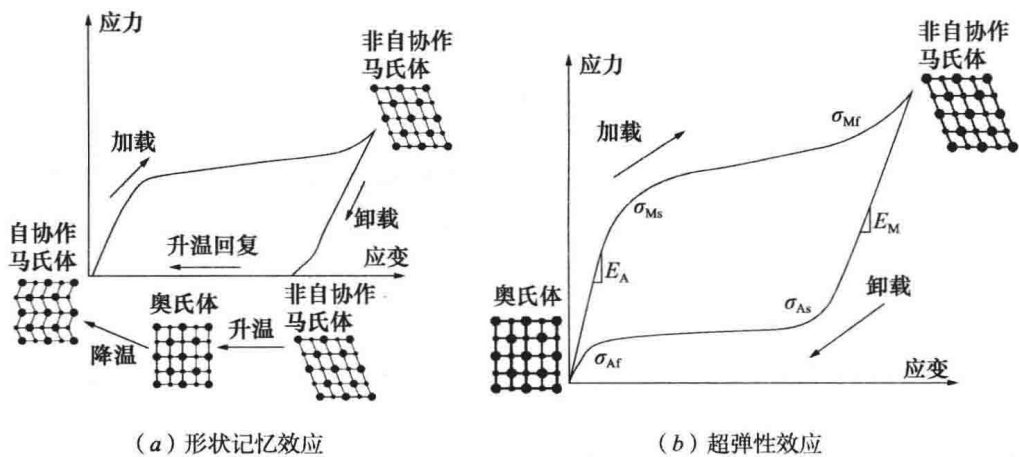


图 1.1 SMA 形状记忆和超弹性效应

广义上，SMA 代表了一系列具有形状记忆或超弹性效应的合金，包括镍钛合金、铜基形状记忆合金、铁基形状记忆合金等。其中，镍钛合金 (NiTiNol) 由于其稳定的性能、合适的工作温度以及较为成熟的生产工艺被认为是最具有工程领域应用潜力的 SMA 类型之一。表 1.1 给出了 NiTiNol 的基本物理与力学特性，并与常规结构用钢进行了对比。NiTiNol 的主要成分是近似等原子比的镍元素和钛元素，其恢复应变能达到 8% 以上，且具有很好的防腐蚀特性。NiTiNol 的相变温度可以通过微调两种元素的原子比进行改变，但值得一提的是，除了材料本身的成分以外，后续的热处理工艺也对 NiTiNol 的力学特性有很大的影响。有研究发现^[4]：不同的热处理温度与热处理时间均会影响 NiTiNol 的相变温度，因此，合适的热处理工艺对保证材料在一定温度范围内具有所期望的力学性能 (例如常温下超弹性性能) 至关重要。另外，热处理过程直接影响 Ti_3Ni_4 的析出程度，这与材料的力学性能密切相关。以国产超弹性 Ti-Ni50.8at.% 为例，在 400 ~ 450℃ 的温度下退火

15 ~ 30min 可以保证材料在常温下具有良好的超弹性特性^[4]，这与试件的尺寸有关，尺寸越大，所需的热处理温度越高以及时间越长。

从市场角度，NiTiInol 已经基本实现了商业化生产，国内 NiTiInol 研发技术也在不断增强。目前，国内研发和生产的机构包括北京有色金属研究总院、中国科学院金属研究所、西北有色金属研究院等。国产商业化 NiTiInol 丝材、棒材、板材等在市场上已经较为常见，特殊尺寸与形状的 NiTiInol 一般也可以定制。另外，NiTiInol 价格的持续下降也为其广泛应用提供了可能。根据美国市场的调查^[3]，2004 年的材料价格与 1999 年相比下降了约 90%，而 2014 年与 2004 相比价格又进一步下降了 80% 以上。随着国内外工程界对 SMA 的认知不断提高以及 NiTiInol 市场的日趋成熟，NiTiInol 在土木工程中的理论和应用研究迎来了前所未有的机遇与挑战。如无特殊说明，本书中 SMA 即为超弹性 NiTiInol。

NiTiInol 与结构用钢的基本材料特性 表 1.1

材料特性	奥氏体 NiTiInol	马氏体 NiTiInol	结构用钢
熔点 (℃)	1240 ~ 1310	1240 ~ 1310	1500
密度 (g · cm ⁻³)	6.45	6.45	7.85
热传导系数 (W · cm ⁻¹ · ℃ ⁻¹)	0.28	0.14	0.65
热膨胀系数 (℃ ⁻¹)	11.3 × 10 ⁻⁶	6.6 × 10 ⁻⁶	11.7 × 10 ⁻⁶
可恢复应变 (%)	8 ~ 10	8 ~ 10	0.2
弹性模量 (GPa)	30 ~ 83	21 ~ 41	205
(伪)屈服强度 (MPa)	195 ~ 690	70 ~ 140	235 ~ 460 (典型)
抗拉强度 (MPa)	895 ~ 1900	895 ~ 1900	390 ~ 540 (典型)
最大伸长率 (%)	15 ~ 20	20 ~ 60	20
泊松比	0.33	0.33	0.30
热加工性能	较好	较好	好
冷加工性能	较差	较差	好
切削加工性	需添加磨料	需添加磨料	好
可焊性	较好	较好	好

1.1.3 SMA 基本元件研究进展

(1) SMA 丝材与棒材

SMA 基本元件通常是构成 SMA 构件或体系的核心部分，决定了结构的功能性、安全性与经济性。目前，SMA 丝材或棒材的应用最为广泛，研究也最为完善。大量研究表明^[5-7]，SMA 丝材与棒材由于受力均匀，呈现出典型的旗帜形滞回曲线，并具有优良的自复位特性、滞回稳定性以及较好的耗能特性。然而，在实际应用中较大直径的光滑 SMA 丝材端部锚固比较困难。另外，建筑结构通常需要较大的承载力，因此需要大量的 SMA 丝材才能满足受力条件，这会使端部锚固问题更加复杂，尤其需要考虑锚固端由于复杂应力导致的丝材断裂问题。大直径 SMA 棒材可以提供足够的承载力，但避免其端部螺纹部分的断

裂是设计中的关键点之一^[8]。虽然可以通过增加螺纹部分与光滑部分的直径比来降低断裂的可能性^[9]，但是这会使加工过程中产生大量的材料残余，造成一定的浪费。总体来说，SMA 丝材与棒材可以在预设变形范围内具有良好的延性，但断裂风险须在设计中谨慎考虑。一般情况下，SMA 棒材的超弹性效果较丝材差，而由于制作工艺的差异，其单位质量成本却可能高于丝材。

(2) SMA 绞线

与钢绞线（钢丝绳）的构造类似，SMA 绞线是由多根（多层）SMA 丝材根据相关标准绞合构成的新型抗拉元件。SMA 绞线可以有效地“放大”SMA 丝材的优越特性，并且提供充足的承载力。相比于 SMA 棒材，取材于丝材的 SMA 绞线造价更低、操作性强，且不存在受压屈曲问题。特别是，SMA 绞线的破坏模式通常是由单丝破坏逐渐向其他丝扩展，破坏过程具有一定的可控性与预警性。因此，其延性和鲁棒性优于 SMA 棒材。相比于 SMA 丝材或棒材，对 SMA 绞线的研究起步较晚^[10-14]。研究表明，SMA 绞线与单根丝材的滞回行为类似，但是对于某些特殊的旋绕方式，会对绞线的受力特性产生影响。目前，SMA 绞线在混凝土结构中的应用研究已经展开^[15]，但总体上研究还处在初步阶段。

(3) SMA 螺旋弹簧

SMA 螺旋弹簧（以下简称“SMA 弹簧”）是 SMA 元件的另外一种形式，如图 1.2 所示。SMA 弹簧的力学特性通常由丝径 d 、外径 D 、螺旋角 θ 以及间距 δ 等几何参数控制。通常，SMA 弹簧呈现出狭长的梭形滞回环特性。有研究者针对 SMA 弹簧恢复力特性建立了宏观模型，并利用 MATLAB 程序进行了数值模拟，验证了模型的适用性和正确性^[16]。Speicher 等^[17]通过试验验证了 SMA 弹簧较好的自复位能力，结果表明，直径为 12.5mm 的实心弹簧在设计最大变形下能提供约 8kN 的承载力。Mirzaeifar 等^[18]建立了 SMA 弹簧的理论分析模型，其结果与试验结果吻合良好，同时发现温度对弹簧性能会产生影响。Savi 等^[19]进一步分析了 SMA 弹簧的几何尺寸对宏观性能的影响，并提出了设计建议。研究发现：由于超弹性效应，SMA 弹簧比普通弹簧具有更大的伸缩变形，并且其承载力与耗能能力可以通过增大弹簧尺寸来实现，但是相对经济性较差。目前，对于 SMA 弹簧，适用于变形需求大，但是承载力需求小的结构或构件。

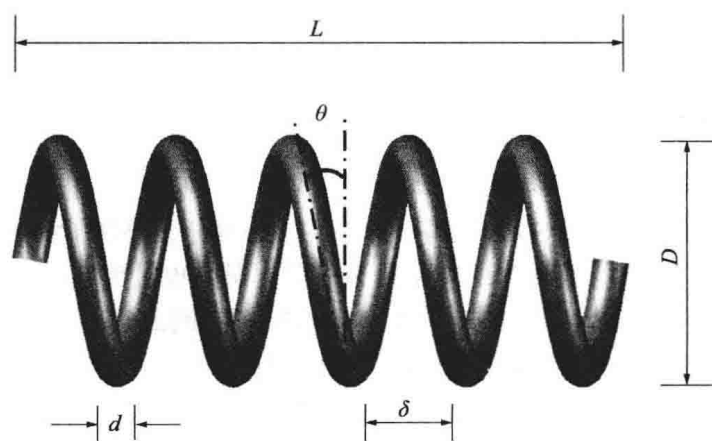


图 1.2 螺旋弹簧几何特征

(4) SMA 碟簧

碟形弹簧（以下简称“碟簧”）为圆锥碟状弹簧，既可以单独使用又可以通过并联或串联进行组合，如图 1.3 所示。碟簧的主要几何参数包括外径 D_e 、内径 D_i 、总高度 H 、厚度 T 以及圆锥角 θ 。传统精钢碟簧由于需要其在弹性范围内工作，所提供的行程较短，而且无耗能能力。而超弹性 SMA 可以有效提高单只碟簧的变形能力，同时促进自恢复以及耗能，因此具有良好的应用前景。Speicher 等^[17]采用 SMA 碟簧用于阻尼器设计，通过试验发现，SMA 碟簧组在循环受压情况下具有很好的自复位性能。研究还发现，圆锥角过大会导致 SMA 碟簧在接近扁平时承载力大幅退化，影响其性能。方成等^[20]提出了适用于抗震应用的 SMA 碟簧几何构型，并通过试验验证了 SMA 碟簧在不同温度下的工作性能。研究发现，在奥氏体状态下的 SMA 碟簧可以具有类似旗帜形的滞回环，其自复位能力与等效阻尼比不低于单轴拉伸的 SMA 丝材或棒材。当温度超过 40℃ 时，由于塑性变形的产生，SMA 碟簧将产生一定的残余变形。Sgambitterra 等^[21]对 SMA 碟簧的生产工艺进行了介绍，并推导了其工作状态下的计算模型，分析结果与数值模型吻合良好，这为 SMA 碟簧的设计与应用奠定了基础。

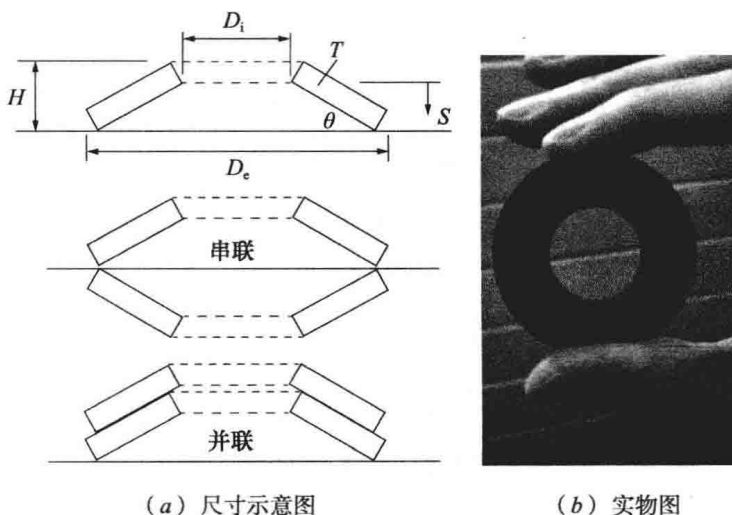


图 1.3 SMA 碟簧几何特性与组合方式

(5) SMA 环簧

SMA 环簧是一种新型高效减震功能元件^[22]，由相互扣合的 SMA 外环和精钢内环组成，变形主要集中于 SMA 外环，而精钢内环保持弹性（图 1.4）。外环的主要几何参数包括外径 D_e 、内径 D_i 、总高度 H 、厚度 t 以及倾角 α ，如图 1.5 所示。由于外环与内环有一定的接触角，所以通过 SMA 外环膨胀来提供承载力，并且通过接触面摩擦与 SMA 材料本身滞回特性相互协作进行耗能，当达到最大变形时环簧自锁，以避免进一步破坏。由于应力诱发马氏体相变，SMA 环簧在有限的环数内可以提供较大的变形空间，在卸载时，由于逆相变的驱动，整个环簧可以自动恢复到初始状态。SMA 环簧可以将轴向（或受弯）受力机制转变为具有过载保护特性的环向受力机制，解决了 SMA 丝材或螺杆锚固、防断裂等方面的难题，并突破了目前 SMA 材料利用率低的瓶颈。目前，相关研究尚处在起步阶段，试验研究与数值分析表明，SMA 环簧由于内外环摩擦作用具有稳定的“广旗帜形”

滞回环（图 1.4），其耗能能力超过了其他 SMA 元件形式。对 SMA 环簧的热处理、摩擦面处理、几何优化等方面的关键问题有待进一步研究。

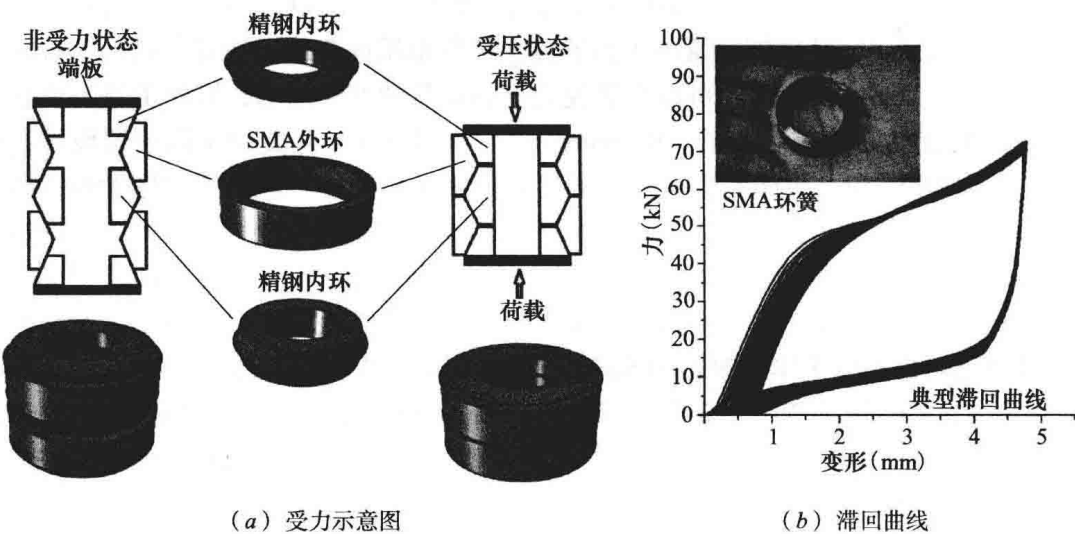


图 1.4 SMA 环簧基本特性与典型滞回曲线

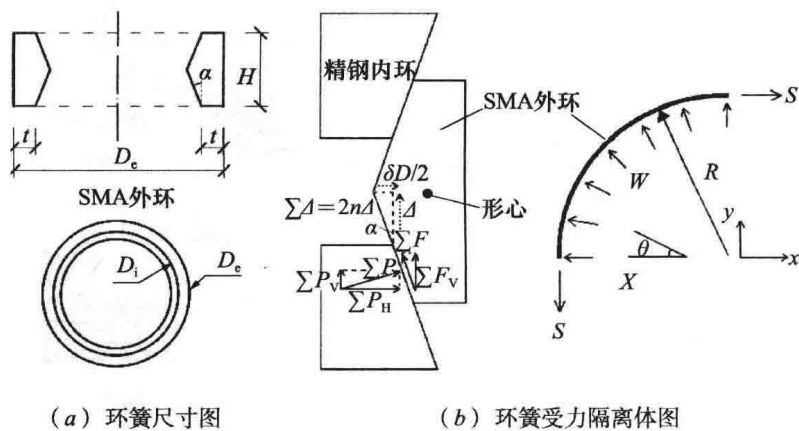


图 1.5 SMA 环簧关键尺寸与受力机理

1.1.4 SMA 构件与装置研究进展

SMA 基本元件形式的日益丰富促进了新型结构构件的开发研究。在钢结构应用领域具有代表性的高性能构件或装置，包括阻尼器、框架支撑和梁柱节点等。此外，包含 SMA 元件的自复位隔震支座研究也受到关注。

(1) 阻尼器与框架支撑

SMA 阻尼器可以提供一定的刚度，因此，通常与抗侧支撑结合使用。李宏男等^[23]提出了一种基于 SMA 丝的阻尼器，试验研究表明：阻尼器在循环荷载作用下具有良好的耗能能力和自复位能力，其性能可以通过调节 SMA 丝的初始应变而改变，用于满足不同工程的需要。虽然 SMA 可以在应变 8% ~ 10% 范围内表现出自复位能力，但是在 大应变循环荷载下退化较明显，因此建议设计最大应变值宜控制在 6%^[24]。陈云等^[25]提出了一种

耗能增强型 SMA 阻尼器，利用杠杆原理放大 SMA 丝的拉伸变形，并且通过预拉 SMA 丝提供饱满的滞回环。Ma 等^[26]也提出了一种新型的 SMA 阻尼器，主要由预张拉的 SMA 丝材和两只预压弹簧组成。预张拉的 SMA 丝材和滚轴为阻尼器提供了耗能与变形能力，预压弹簧为阻尼器提供了预期的恢复力。另外，新型 SMA 拉压扭阻尼器^[27]可以有效抵抗多维地震作用。一系列基于混合耗能机制的新型阻尼器也在研发中，SMA-摩擦阻尼是混合耗能机制的代表之一^[28, 29]。

另外，与屈曲约束支撑 (BRB) 类似，基于 SMA 的自复位防屈曲支撑的研究也取得了很大进展。Miller 等^[30]在屈曲约束支撑中使用了 SMA 大尺寸棒材，从而达到减少支撑残余变形的目的 (图 1.6)。通过试验发现，该新型支撑具有良好的耗能能力和自复位能力，并且自复位能力和 SMA 棒材的预紧力密切相关。Yang 等^[31]评估了混合抗震支撑的性能，其核心部分由一套 SMA 丝材和两组耗能支柱组成，其中 SMA 丝材被安装在引导用的高强度钢管内，设计最大应变在 6% 之内。通过数值分析表明，采用混合阻尼支撑的框架结构可以具有与 BRB 支撑体系相似的耗能能力，同时具有较好的自复位能力。许贤等^[32]在钢结构偏心支撑耗能连梁中设置了 SMA 螺杆 (图 1.7)，通过偏心支撑连梁的转角变形进行耗能，并借助 SMA 螺杆提供自复位能力。

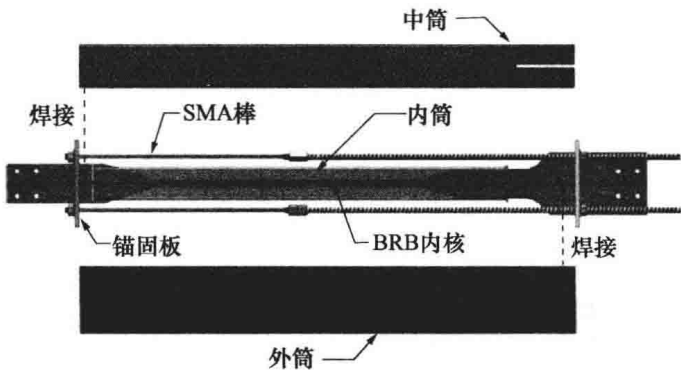


图 1.6 SMA-BRB 混合自复位支撑^[30]

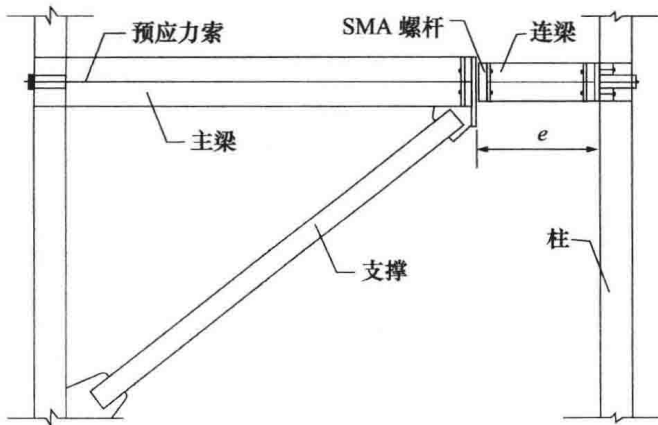


图 1.7 SMA 自复位偏心支撑钢框架^[32]

(2) 梁柱节点

除 SMA 支撑外，也可以在梁柱节点设置 SMA 元件，促使整体结构自复位，保证其