

形状记忆合金在航空航天领域的应用研究综述

渠磊¹, 闫泽红¹, 饶智祥¹, 王啸远¹, 冷佳明¹, 万维锋¹, 闫晓军^{1, 2, 3, 4}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191;

4. 北京航空航天大学 航空发动机结构强度北京市重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 为了在航空航天领域更好地利用形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)的形状记忆效应和超弹性两方面的突出力学特性, 综述了 SMA 在材料与工艺、本构模型、形状记忆效应应用和超弹性应用方面的研究进展。主要探讨了 NiTiHf、NiTiAu 等三元高温合金、SMA 热处理工艺和 3D 打印工艺、形状记忆效应和超弹性本构模型、利用形状记忆效应设计的 SMA 丝、管、弹簧和带驱动器、利用超弹性设计的减振器、自适应结构等在航空航天领域的应用研究特点, 并指出当前存在的不足。该研究表明: 随着材料、工艺、控制、信息技术的融合发展, SMA 的应用研究将向着更宽的工作温度范围、结构多样化以及智能化方向发展。

关 键 词: 形状记忆合金; 形状记忆效应; 超弹性; 航空航天; 本构模型; 压紧释放机构

中图分类号: V252.9

文献标志码: A

Review on shape memory alloys' application in field of aerospace

QU Lei¹, YAN Zehong¹, RAO Zhixiang¹, WANG Xiaoyuan¹, LENG Jiaming¹,

WAN Weifeng¹, YAN Xiaojun^{1, 2, 3, 4}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,

Beihang University, Beijing 100191, China;

4. Beijing Key Laboratory of Aero-Engine Structure and Strength,

Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to better utilize the outstanding mechanical properties of shape memory alloys (SMA) in both shape memory effect and superelasticity in aerospace field, the research progress of SMA in terms of materials and process, constitutive model, shape memory effect application and superelasticity application was reviewed. The research features of the ternary high-temperature alloys, such as NiTiHf and NiTiAu, SMA heat treatment process and 3D printing process, shape memory effect and superelasticity constitutive model, SMA wire, tube, spring and belt actuators designed by using shape memory effect, vibration dampers and adaptive structures designed by using superelasticity in aerospace field were mainly discussed, and their current shortcomings were presented. The future trend of SMA application was proposed: with the integrated development of materials, process, control, and information technology, the

收稿日期: 2022-07-09

作者简介: 渠磊(1996—), 男, 博士生, 主要从事智能结构研究。

通信作者: 闫晓军(1973—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事智能结构、微型飞行器动力、高温结构力学研究。

E-mail: yanxiaojun@buaa.edu.cn

引用格式: 渠磊, 闫泽红, 饶智祥, 等. 形状记忆合金在航空航天领域的应用研究综述[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2127-2141. QU Lei, YAN Zehong, RAO Zhixiang, et al. Review on shape memory alloys' application in field of aerospace[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10): 2127-2141.

structures with SMA could show more structure diversity and work in a wider range of working temperature with more intelligence.

Keywords: shape memory alloys; shape memory effect; superelasticity; aerospace; constitutive model; hold-down and release mechanism

形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)是一类在温度或其他条件发生变化时,能够“记忆”其初始形状的合金材料。1932年,瑞典科学家Ölander^[1]发现了如下现象: AuCd合金在冷却时发生变形,加热后形状完全恢复。1951年,Chang等^[2]发现 AuCd系列合金在马氏体状态变形后,加热后可回复到初始形状,这就是SMA的突出力学特性之一——形状记忆效应。1963年,美国海军武器实验室Buehler等^[3]发现近等原子比的NiTi合金也具有形状记忆效应,这一发现使学术界和工程界认识到了SMA的重要性,为其工程应用提供了可能。此后世界各国的科学家相继发现了其他成分的形状记忆合金,包括铁基形状记忆合金和铜基形状记忆合金等^[4-5]。尽管不同形状记忆合金对于特定的应用要求或场景都有各自的优势,但NiTi基形状记忆合金材料在形状记忆效应、韧性、热机械性能、抗腐蚀性和生物相容性等方面均有优异的表现,因而在科学研究、尤其是工程应用中占据着主导地位。

SMA主要有两种突出力学特性:形状记忆效应和超弹性。如图1所示, SMA存在两种不同的相和3种不同的晶体结构,即孪晶马氏体、非孪晶马氏体和奥氏体。其中,马氏体相在低温下是稳定的,奥氏体相在高温下是稳定的。形状记忆效应是指SMA在处于低温孪晶马氏体结构时,通过加载转变为非孪晶马氏体并产生变形,对其加热后SMA转变为奥氏体并消除变形,恢复到初始形状。超弹性是指SMA在处于高温奥氏体结构时,通过加载使奥氏体转变为非孪晶马氏体并产生变形,卸载后SMA转变为奥氏体并立即回复初始形状^[6]。此外, SMA还有其他性能,例如相变迟滞特性、电阻可变特性、大阻尼特性等。

SMA应用于航空航天领域具有诸多优势。相比于其他材料, SMA比强度高,耐腐蚀性好。利用其形状记忆效应时,其具有高能量密度和高功输出^[7-8],设计的驱动器结构紧凑、可靠性高,可长期重复使用;利用其超弹性时,其可以产生超大且饱满的应力应变滞回圈,具有优异的吸能减

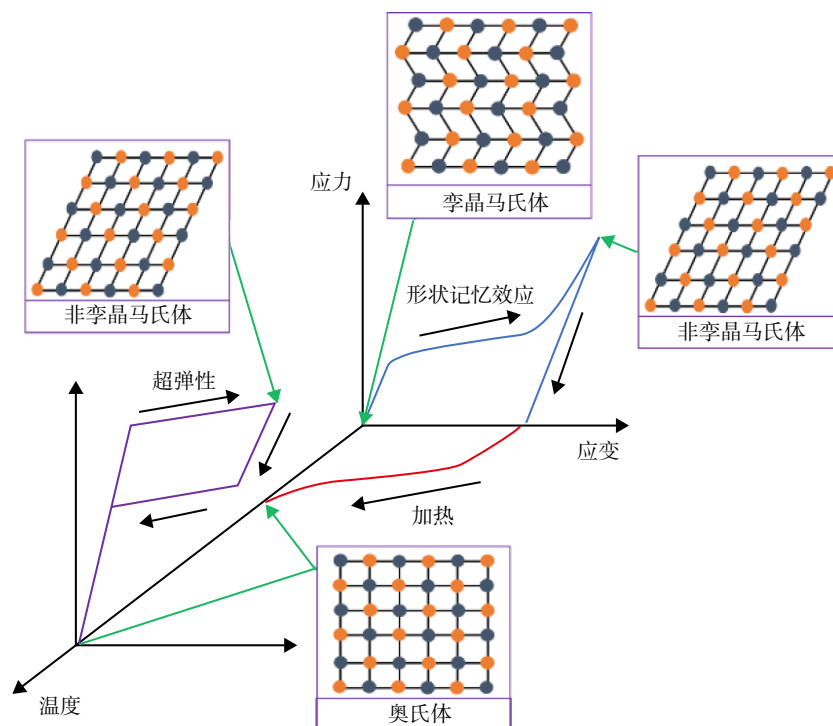


图1 形状记忆效应和超弹性^[6]

Fig. 1 Shape memory effect and superelasticity^[6]

振和大变形回复性能。

SMA 在航空航天领域的应用已经有五十多年的历史。1969 年, 形状记忆合金管接头成功应用于美国 F14 战斗机的输油管路^[9-10], 之后, 采用 SMA 设计的机构、结构逐渐应用于航空航天领域的各个方面, 例如空间压紧释放机构、航空发动机进气道的几何调节、机翼偏转和减振器等^[11-14]。

本文对国内外科研机构开展的关于 SMA 在航空航天领域的应用研究进行了总结和归纳, 主要包括 4 个方面: ①材料与工艺; ②本构模型; ③形状记忆效应应用; ④超弹性应用。最后针对技术发展趋势, 对后续研究和应用趋势进行了展望。

1 材料与工艺

针对 NiTi 基形状记忆合金材料方面的研究, 当前主要有两个方向, 一是研究 NiTi 二元合金的不同成分配比, 二是在 NiTi 合金基础上添加其他元素。SMA 的传统处理工艺一般包含热变形、冷变形、热处理、稳定化训练等 4 个方面, 通过工艺处理可以改变 SMA 材料的宏观结构和微观组织, 达到稳定定型、改善性能的目的。最新的制造工艺还包括 3D 打印工艺。为了满足航空航天的高低温、复杂载荷的工作环境要求, 本节重点关注的研究包括: 通过添加第三元素或热处理工艺从而大大拓宽 NiTi 基合金相变温度范围, 热处理工艺对 SMA 定型、改善性能的作用, 以及 3D 打印 SMA 具有的新优势。

1.1 相变温度的拓宽

根据成分中 Ni、Ti 的比例不同, 目前常用的 NiTi 二元合金的奥氏体相变开始温度在 $-50\sim 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化^[15], 基本可以满足常规技术的应用需求。但在航空航天部分场景下使用环境温度高于 $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, 例如由于太阳辐射作用, 航天器表面环境温度超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[16], SMA 应用于航天器舱外时, 便需具有更高的相变温度。为了弥补 NiTi 二元合金相变温度范围的不足, 常用的方法有两种: 添加第三元素和热处理。

在 NiTi 二元合金的基础上添加第三元素, 分为两类: 一类是添加 Hf 和 Zr, 一类是添加贵金属 Au、Pd 和 Pt 等。Karakoc 等^[17-18]研究了 $\text{Ni}_{50.3}\text{Ti}_{29.7}\text{Zr}_{20}$ 与 $\text{Ni}_{50.3}\text{Ti}_{29.7}\text{Hf}_{20}$ 高温形状记忆合金, 结果表明两种高温形状记忆合金的相变温度明显高于 NiTi 二元合金, 达 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Monroe 等^[19]研究了 $\text{Ni}_{29.5}\text{Ti}_{50.5}\text{Pd}_{30}$ 合金, 其相变温度可达 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Casalena 等^[20]研

究了 NiTi-40Au 合金, 其相变温度可达 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

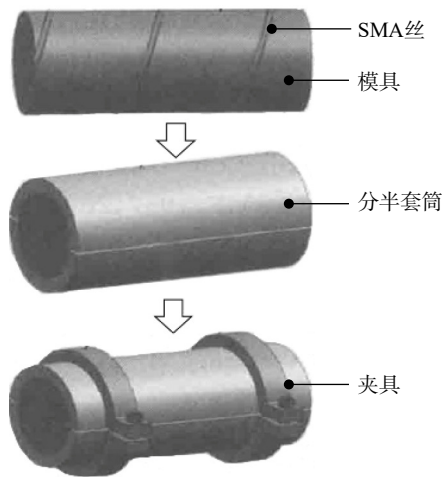
适当的热处理也可以提高 SMA 的相变温度。Drexel 等^[21]对 $\text{Ni}_{49.2}\text{Ti}_{50.8}$ 二元合金进行了热处理, 结果表明热处理温度在 $400\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 奥氏体相变温度随保温时间增加而提高, 幅度约为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Kok 等^[22]通过实验也表明延长热处理时间可获得较高的奥氏体相变温度。

添加第三元素和热处理均可以使相变温度拓宽, 但效果不同。添加第三元素形成的高温形状记忆合金相变温度范围更大, 在航空航天应用中, 相比于添加贵金属 Au、Pd 和 Pt 的 SMA, 虽然添加 Hf 或 Zr 的 SMA 相变温度提升较小^[17-18], 但其价格低廉、加工性能良好, 相变温度约为 $100\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 已经满足航空航天多数应用场景, 例如, Bena-fan 等研制了采用 NiTiHf 材料的扭转驱动器用于展向自适应机翼^[23]、直线驱动器用于空间探测的岩石劈裂器^[24-26], 因此该类高温 SMA 应用前景较广; 反之, 添加贵金属 Au、Pd 和 Pt 的 SMA 虽然相变温度提高较多, 达到 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上^[19-20], 但由于过于昂贵, 难以实现大规模工程化应用。通过热处理方法一般只能使相变温度提升几度到几十度, 在实践中, 一般先根据使用温度范围确定 SMA 材料成分并加工, 再通过热处理微调相变温度以满足需求。

1.2 热处理工艺

SMA 在航空航天领域的应用环境复杂, 对于采用 SMA 设计的结构或机构来说, 不仅要求相变温度合适, 也要求 SMA 有合适的形状和稳定的性能。SMA 通常是通过冷加工获得的, SMA 内部存在有残余应力, 且组织不均匀, 需要通过热处理工艺改变其性能。热处理是指将 SMA 放在加热炉内加热、保温、冷却, 通过改变其内部的晶体组织结构、来改变其性能的一种工艺。SMA 热处理工艺主要有两个作用: 一是对 SMA 定型, 以适应不同应用环境下的形状需求; 二是改善 SMA 的性能, 获得稳定的形状记忆、超弹性等性能。

通过热处理工艺可以获得需要的 SMA 形状。北京航空航天大学智能推进实验室^[27]将形状平坦的 SMA 梁置于设计的模具中, 然后通过热处理, 得到了不同挠度的 SMA 梁; 该实验室^[6, 28]还利用热处理对 SMA 丝的初始形状进行了定型设计, 如图 2 所示, 通过热处理成功得到了 SMA 丝绕制成的 SMA 旋转驱动器, 该驱动器可以将

图 2 热处理定型过程^[6]Fig. 2 Heat treatment setting process^[6]

SMA 直线运动输出转化为旋转运动输出。

热处理工艺还可以用于改善 SMA 性能。Liu 等^[29]在 500 ℃ 下对 SMA 丝进行短时时效处理后,其永久变形小于 0.05%,在常温下具有良好的回复能力。Mahmud 等^[30]研究了退火温度对 NiTi 合金马氏体稳定性的影响,结果表明:在低退火温度下 NiTi 合金超弹性性能更加稳定。Ben 等^[31]对 NiTi 二元合金进行不同时效热处理,其研究结果表明:当热处理温度范围在 500~650 ℃ 之间,富镍 NiTi 合金可以获得稳定的超弹性性能。胡励^[32]对 NiTi 合金进行了不同温度的包套压缩试验,结果表明:在 400 ℃ 条件时,包套压缩试验有利于晶粒细化,进而改善 SMA 的形状记忆性能和超弹性性能。

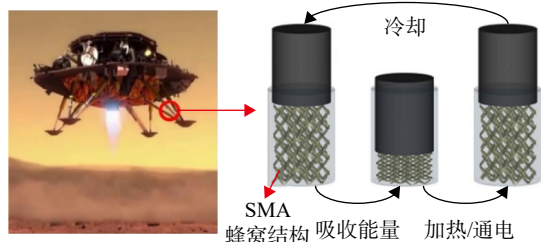
针对航空航天领域对于材料性能的高要求,以及部分场景对于机构体积的限制,通过热处理工艺可以优化 SMA 内部组织来改善其性能,并同时达到定型的目的。目前的热处理工艺主要表现为:针对不同成分、不同结构形式的 SMA,优化加热温度和保温时间,得到需要的形状与性能。

1.3 3D 打印工艺

航空航天领域对 SMA 结构质量、可靠性要求较高,采用 3D 打印生产的一体化结构可以更好地满足该需求。3D 打印是一种新型工艺,其以数字模型文件为基础,运用粉末状金属等可粘合材料,通过逐层打印的方式来制造结构。

通过三维结构设计,3D 打印可以直接生产出具有特定功能的结构。比利时 Dadbakhsh 等^[33]通过 3D 打印生产出了致密的 NiTi 合金,有圆柱体、正方体等构型。Nematollahi 等^[34]利用 3D 打印制

备了不同几何和功能特性的 NiTiHf 高温形状记忆合金。中国石油大学 Xiong 等^[35]采用 3D 打印制备了蜂窝状 NiTi-SMA,如图 3 所示,蜂窝状的 NiTi-SMA 用于填充空间着陆器的着陆腿,其在着陆时吸收能量,然后通过电或加热刺激迅速恢复到初始形状;冷却后, SMA 恢复到马氏体状态,可以在不更换填充材料的情况下为下一次着陆做好准备。

图 3 3D 打印蜂窝结构的应用^[35]Fig. 3 Application of 3D printed honeycomb structure^[35]

对于在航空航天领域的应用来说,3D 打印工艺的优势在于通过一体化结构设计,减少了不必要的连接结构,进而减轻了结构质量。3D 打印也存在一些不足,例如:由于技术成熟度不高,3D 打印过程中已凝固部分的 SMA 与粉体 SMA 之间由于热物理性质存在差异,导致打印结构的致密度受到限制^[36]。

2 本构模型

SMA 本构模型是对 SMA 在不同温度和载荷下应力-应变关系的描述,根据 SMA 应用场景的不同,可以分为形状记忆效应本构模型和超弹性本构模型。

2.1 形状记忆效应本构模型

形状记忆效应本构模型以描述 SMA 的形状记忆特性为主,主要描述 SMA 在作动过程中的应力应变特性,一般可以分为宏观本构模型、微观本构模型以及微观本构模型^[6, 37]。微观本构模型主要描述的是材料的微尺度力学行为,侧重于机理研究。由于在航空航天应用中, SMA 驱动器性能预测是设计的关键环节,因此本节主要介绍用于 SMA 驱动器性能预测的宏观本构模型和微观本构模型。

2.1.1 宏观本构模型

宏观本构模型基于材料热力学框架,建立了材料自由能的表达式,并推导了 SMA 相变过程的驱动力,进而获得材料的本构方程^[38]。宏观本

构模型的优点是引入了较少的内变量和材料参数,模型参数易于获取,可以高效模拟 SMA 的应力-应变变化。针对常用的 SMA 作为驱动器使用的结构形式:丝、管、弹簧和带,宏观本构模型主要发展了两类本构模型:一维本构模型和三维本构模型。

一维本构模型主要描述 SMA 丝等一维构件在单轴载荷、不同温度下的应力-应变响应。Tanaka 等^[39]于 1986 年最早建立 SMA 宏观本构模型,其提出采用马氏体体积分数作为内变量描述马氏体相变的一维宏观本构模型,并假设马氏体体积分数随温度和应力呈指数变化,即指数型硬化函数。Liang 和 Rogers^[40]在 Tanaka 等的基础上,提出了余弦型硬化函数代替指数型硬化函数,由于余弦型硬化函数更加符合试验结果,因此计算结果更加准确。但 Liang、Rogers 和 Tanaka 等的一维本构模型没有考虑马氏体重取向和相变过程中材料参数的变化。因此,Brinson^[41]在 Liang-Rogers 模型的基础上将马氏体体积分数分为温度诱导和应力诱导两部分,完整考虑了 SMA 的 5 个相变过程,计算精度大大提高。北京航空航天大学智能推进实验室^[42]于 2014 年在考虑 SMA 相变诱导塑性的基础上,提出了描述 SMA 循环衰减的一维本构模型。

随着 SMA 管、弹簧、带等三维构件更多地用于驱动器,大大促进了三维本构模型的发展。三维本构模型主要描述 SMA 管等三维构件在不同温度和载荷下的应力应变响应,其承受的可以是单轴或多轴载荷。Lagoudas 等^[43]于 1995 年提出了基于热力学框架 SMA 三维本构模型,该模型建立了以马氏体体积分数为内变量的流动法则。之后,Qidwai 和 Lagoudas^[44]于 2000 年进一步提出了该模型的回退映射数值求解方法,并编写了可用于有限元分析的材料本构子程序 UMATs。Hartl 等^[45]于 2009 年发展了同时考虑相变和屈服耦合的三维本构模型。Mirzaeifar 等^[46]于 2013 年提出了考虑 SMA 拉压不对称性的三维本构模型,该模型可以对平板的三点弯试验进行预测。Xu 等^[47]于 2020 年提出了大变形的三维本构模型,该模型引入内应力并将其与马氏体体积分数相关联,考虑了 SMA 的双程记忆效应,可以很好地描述 SMA 在不同温度下的循环变形。

SMA 一维本构模型引入的参数较少,在对 SMA 丝驱动器进行设计时可以直接应用并具有

较高的精度。SMA 三维本构模型引入了更多的材料参数,可以对不同复杂构型、承受多轴载荷下的 SMA 相变过程中的应力和应变进行预测。在驱动器设计时,将宏观本构模型理论编写为可用于有限元分析的材料本构子程序 UMATs,进而可以对不同结构形式的 SMA 驱动器进行训练、模拟环境的一体化优化设计,从而实现驱动器的高准确度优化设计,仿真误差小于 8%,大大降低了试验与时间成本^[27]。目前,已有的模型均考虑了马氏体相变,还考虑了其余部分变形机制,包括相变诱导塑性、塑性变形、双程记忆效应和拉压不对称性等^[41-42, 45-47],但目前尚未有全面考虑前述 5 种变形机制的宏观本构模型。

2.1.2 细观本构模型

细观本构模型是基于细观力学理论,在晶粒尺度上描述 SMA 的力学行为,并可以从物理上解释 SMA 的各种变形机制^[48]。常见的细观本构模型是基于晶体塑性理论的本构模型^[48-51],其通过平均的方法将单个晶粒的力学行为扩展到代表性体积元上,可以较好地描述宏观力学行为。

基于晶体塑性理论的本构模型可以对 SMA 多种变形机制进行描述。Patoor 等^[49]最早将晶体塑性理论引入到 SMA 细观本构模型,该模型将 SMA 的宏观相变应变率与马氏体变体的相变应变率相关联。Thamburaja 等^[50-51]通过晶体塑性的方法,探究了晶体织构对拉压不对称性的影响。于超^[48]考虑了相变诱导塑性和残余马氏体等引入的循环衰减,在单晶尺度上建立了热力耦合的循环本构模型,并采用尺度过度准则得到了多晶 SMA 的循环本构模型。

目前,国内外很多学者提出的基于晶体塑性理论的本构模型已经可以用来描述单晶材料的非弹性变形机制,部分模型可以通过尺度过渡方法来描述多晶材料的变形机制^[52-54]。由于细观本构模型引入了较多的材料参数,采用的内变量较多,因此多用于材料应力应变温度响应的预测,较少用于驱动器变形预测,驱动器变形预测目前以宏观本构模型为主。

2.2 超弹性本构模型

SMA 的超弹性特性是一种强的非线性,选用合适的数学模型来描述 SMA 构件的迟滞特性,从而准确预测其振动响应,对于 SMA 减振构件的设计来说是至关重要的。

对 SMA 超弹性描述的经典模型有: Graess-

er 模型^[55], Bouc-Wen 模型^[56-57] 等。北京航空航天大学智能推进实验室^[58] 提出简单折线超弹性模型, 可求解 SMA 超弹性系统在随机载荷下的振动响应。哈尔滨工业大学张景业^[59] 建立了 SMA 超弹性单自由度系统的振动理论模型, 并得到了系统在简谐激励下的振动响应。大连理工大学牛健^[60] 提出了一种 SMA 材料的阶跃 Bouc-Wen 模型, 其能够准确地描述低频加载下 SMA 的超弹性滞回圈的吸能减振性能。

在结构计算中采用什么样的超弹性本构模型, 需要根据系统所受的激励载荷, 求解方法等因素来确定。利用数值方法求解 SMA 超弹性系统在随机激励下的响应时, 可选用在 Bouc-Wen 模型基础上发展的 Graesser 模型, 缺点是求解时间长, 效率低; 利用等效线性化方法求解时, Graesser 模型由于表述上的原因, 不适合采用, 利用简单折线超弹性模型^[58], 则可以方便、高效地得到系统的响应, 求解效率高, 且精度能够满足工程需要。

3 形状记忆效应应用

形状记忆效应是 SMA 最主要的特性之一, 航空航天领域根据其可以设计驱动器或一些特定结构。SMA 比强度高, 耐腐蚀性好, 作动时能量密度高、功输出高, 因此使得设计的结构更加紧凑, 可靠性更高, 满足长期重复使用需求。本节主要针对 SMA 常见的 4 种驱动器的结构形式进行介绍: SMA 丝、SMA 管、SMA 弹簧和 SMA 带。

3.1 SMA 丝

由于 SMA 丝直径小、电阻大, 可直接通电控制加热作动, 并且输出位移大, 能满足不同规格机构的作动位移要求, 尤其是航空航天领域对空间、功耗利用率以及自动化控制要求较高, SMA 具备上述优势, 因此得到了广泛应用。航空航天领域常见的 SMA 丝驱动的机构目前主要有两类: 一类是压紧释放机构, 用于实现飞行器中可分离结构与固定结构的连接与分离; 另一类是主动变形结构, 用于驱动特定结构的偏转变形。

3.1.1 压紧释放机构

SMA 丝驱动的压紧释放机构主要用于替代传统采用火工品爆炸来驱动的机构, 相比于火工品, 其具有无污染、低冲击、可重复使用等优点, 尤其是在精密仪器设备的连接与分离方面有很大优势, SMA 驱动的压紧释放机构主要包括两个部分, 承载部分和触发驱动部分, 两者之间有一个

载荷传递的结构。根据机构中载荷传递的级数, 可以分为单级触发机构和多级触发机构。

单级触发机构结构较为简单, 其工作原理一般是: SMA 丝通电受热后直接驱动相关结构移动, 从而解除对承载结构的限位, 完成释放功能。意大利那不勒斯第二大学 Gardi^[61] 研制了 SUN-VR 机构, 该机构是利用 3 根 SMA 驱动的单级钢球机构。北京航空航天大学智能推进实验室研制了 SMA-30000 分瓣螺母释放机构^[62], 该机构是利用 SMA 丝驱动的单级分瓣螺母释放机构(如图 4): 机构采用 2 根 SMA 冗余设计, 提高了机构的可靠性, 同时由于采用了滚棒, 减小了箍环运动时的摩擦阻力, 可实现最高 40 kN 的释放载荷。

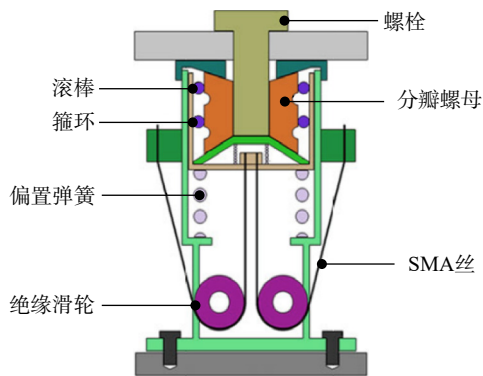


图 4 SMA-30000 压紧释放机构^[62]

Fig. 4 SMA-30000 hold-down and release mechanism^[62]

多级触发机构相对复杂, SMA 通电受热后通过多级结构(如钢球等)传递载荷, 进行作动, 最终解除对承载结构的限位, 完成释放功能。相比于单级触发机构, 多级触发机构承载能力强, 国内外研究人员对多级触发机构的研究更多。美国 TiNi 公司研制了 SMA 丝驱动的拔销器^[63], 该机构可通过从顶部拔出销或从底部推出销手动复位。韩国 KAIST(Korea Advanced Institute of Science and Technology)研制了二级分瓣螺母释放机构^[64], 该机构复位时需要用专用的工装复位。西班牙 Vázquez 等^[65] 研制了 NEHRA(non explosive hold-down release actuator)二级旋转释放机构, 该机构复位是将螺旋扭转弹簧预加载到锁紧位置, 可以手动执行。西班牙 Nava 等^[66] 于 2014 年研制了 REACT(resettable non-explosive actuator)SMA 丝旋转驱动的三级钢球释放机构。西班牙 Col-lado 等^[67] 于 2019 年研制了第二版 REACT V2 分瓣螺母压紧释放机构, 图 5 为 REACT V2 分瓣螺母机构作动示意图, 图 6 为机构实物图。该机构

通过使用简单的工具将外环返回复位位置,进行复位。国内北京航空航天大学智能推进实验室研制了多款多级触发机构^[6, 68-70],分别采用分瓣螺母和多级钢球原理,这些机构可通过在机构内设置偏置弹簧来实现复位功能。

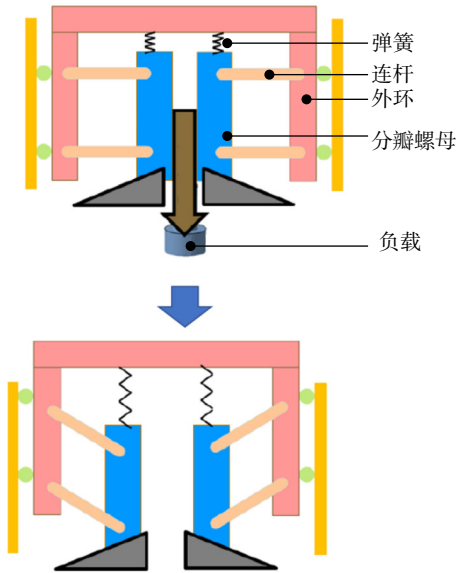


图 5 REACT V2 压紧释放机构^[67]
Fig. 5 REACT V2 hold-down and release mechanism^[67]



图 6 REACT V2 实物图^[67]
Fig. 6 REACT V2 image^[67]

SMA 丝驱动的压紧释放机构性能如表 1 所示。目前,国内外已经有多型采用 SMA 丝驱动的压紧释放机构成功实现在轨应用。在众多 SMA 机构中,已经实现了大承载、无污染、低冲击、可重复使用等功能,SMA 丝驱动的压紧释放机构逐步在向轻量化、自动化和智能化的趋势发展。结构设计趋于紧凑小巧,减少了质量并节省了安装空间;安装使用过程更加便捷,特别是复位过程大幅简化;部分设计方案能够提供自身状态指示信号,便于调节控制。

表 1 国内外 SMA 丝驱动的压紧释放机构

Table 1 Domestic and foreign SMA wire actuated hold-down and release mechanism

型号	载荷/ kN	释放时间/ s	质量/ g	包络尺寸 (直径×高度)/ (mm×mm)
TiNi 拨销器	0.45	0.1	360	
KAIST	15	0.05	275	35×72
NEHRA	20	1	400	70×38
REACT	35	10	354	78×78
REACT V2	5	1.1	230	
SUNVR	0.78			
SMA-30000	30	14	430	46×84
SMA-10000	10	0.1	240	41×60
SMA-3600	3.6	0.3	250	42×61
RLLPD	0.35	8		

3.1.2 主动变形结构

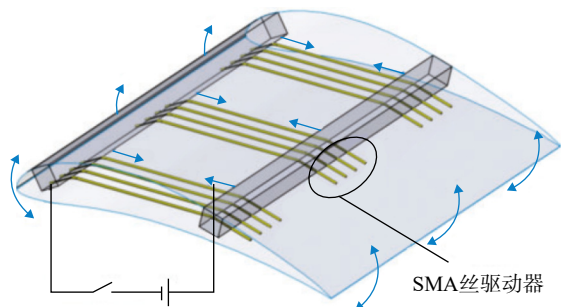
将 SMA 丝作为主动变形结构的一部分嵌入到蒙皮等结构中,通过环境温度的改变或通电加热的方式,控制 SMA 的伸长与缩短,进而改变结构的形状和角度,完成相应的减阻、降噪等功能。这一类结构通常为机翼等大型构件,需要较大的驱动力,因此多采用 SMA 丝束驱动。

主动变形结构多用于机翼或进气道等结构的偏转。美国国防高级研究计划局(DARPA)在 1999 年提出了智能航空与航海推进系统论证(SAMPSON)计划,包括智能机翼、叶片等。其中一个项目是在 F15E 战斗机进气道设计中采用 SMA 替换原有的液压驱动器,驱动整流罩和唇板来实现进气道的变几何调节^[71-73]。该结构在 2000 年进入 Hampton 跨声速风洞进行了试验验证,试验证明了该结构在实际工作环境下的性能:最大气动载荷下, SMA 驱动器可在 30 s 内驱动整流罩移动 6°、唇板旋转 23°。2020 年, Ashir 等^[74]研究了一种基于 SMA 丝和增强纤维的自适应变形机翼,图 7 为 SMA 丝在机构变形中的工作原理。试验结果表明:该变形机翼可在电流为 1 A 的条件下,作动 60 s 后达到最大变形 2.8 mm。

SMA 丝驱动的主动变形结构通常会采用多束 SMA 丝以提高驱动力,此时需要考虑驱动的不同步性问题。此外,由于 SMA 丝是嵌入到蒙皮等结构中,还需要解决与蒙皮的连接、作动时的相互运动等技术问题。

3.2 SMA 管

SMA 管的直径大,相比于 SMA 丝,其输出载

图 7 SMA 丝在机构变形中的工作原理^[74]Fig. 7 Working principle of SMA wire in the mechanism deformation^[74]

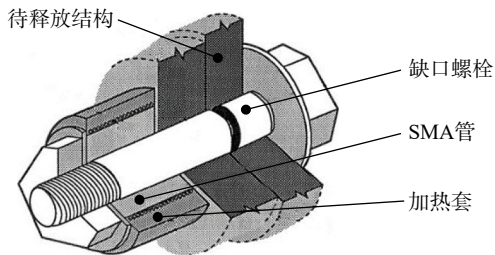
荷更大,并且可输出不同形式的载荷,如推力、扭矩以及径向力等。根据 SMA 管输出载荷的形式可以设计成不同用途的驱动器或特定的结构,常见的有直线驱动器、扭转驱动器和径向密封结构。

3.2.1 直线驱动器

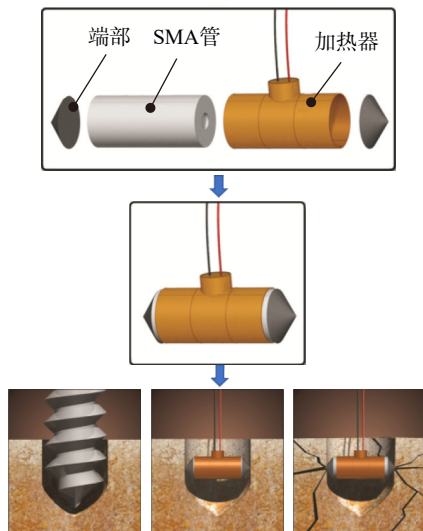
当 SMA 管作为直线驱动器使用时,典型的使用方法是使用前对其施加压缩载荷,使其产生一定的压缩变形,需要驱动时,对 SMA 管进行加热,产生回复位移驱动结构运动,从而完成相应功能。

SMA 管直线驱动器可以用于驱动压紧释放机构。美国国家航空航天局(NASA)是较早将 SMA 管应用于航空航天领域的研究部门,其研制了单级分瓣螺母压紧释放机构^[75],该机构由于采用了限位销限位,可靠性较高。Hi Shear Technology Corporation(HSTC)公司研制的大载荷分瓣螺母压紧释放机构也是利用 SMA 管驱动的^[76]。美国 TiNi 公司研制的 Frangibolt 是利用 SMA 管驱动的压紧释放机构^[77-78],图 8 为 Frangibolt 机构示意图,该机构主要由缺口螺栓、SMA 管、加热套组成。机构作动时,对 SMA 管加热使其伸长,缺口螺栓在 SMA 管的作用下胀断,完成分离功能。

SMA 管直线驱动器也可以用于空间探测用的岩石劈裂器。Benafan 等^[24-26]研制了 SMA 岩石劈裂器(SMA rock splitter, SMARS),用于在空间

图 8 Frangibolt 机构^[78]Fig. 8 Frangibolt mechanism^[78]

环境中实现可控静态岩石劈裂。SMARS 使用的是 $\text{Ni}_{50.3}\text{Ti}_{29.7}\text{Hf}_{20}$ 三元高温 SMA, 该 SMA 经过训练可轴向膨胀。图 9 为 SMARS 结构示意图及工作过程, SMARS 包括 SMA 管、加热器和端部的钻头,端部的钻头可以根据任务需要更换,包括锥形、球形、圆柱形和扁平端。工作时,先用垂直钻头向下打孔,然后将 SMARS 置于深孔内,对其通电加热,两端伸长使得岩石破碎及分裂。

图 9 SMA 岩石劈裂器(SMARS)^[24-26]Fig. 9 SMA rock splitter (SMARS)^[24-26]

SMA 管用于直线驱动器的优势是其输出力较大。在用于压紧释放机构时,相比于采用 SMA 丝的机构,结构更加简单;在用于岩石劈裂器时,其具有体积小、质量轻的优势,特别适用于未来航天器和探测器上使用。SMA 管的主要缺点包括输出位移小、加热作动时间长、循环使用残余应变积累明显等,使用时需要有针对性地克服上述不足。

3.2.2 扭转驱动器

SMA 扭转驱动器的特点是其可以用较小的尺寸输出较大的扭矩,在航空航天领域对空间、功能性要求高的情况下, SMA 扭转驱动器具有很大的优势。

SMA 扭转驱动器常见于航空领域,如桨叶、叶片以及机翼等的扭转。美国海军航空系统司令部(NAVAIR)^[71, 79]于 2008 年资助的可重构转子叶片(reconfigurable rotor blade, RRB)项目中的桨叶也是采用 SMA 管扭转驱动的,该扭转驱动器可以提供超过 6.8 N·m 的扭矩和 3.4 J 的能量,并能承受转动的环境,同时该驱动器可以提供 250

次扭转且没有性能损失和异常情况。Herrington 等^[80]于 2015 年重新设计了一型 SMA 扭转驱动器,使跨度为 0.914 m 的机翼实现了 10°的扭转。Benafan 等^[23]在 2019 年提出了展向自适应机翼(spanwise adaptive wing, SAW)概念,其使用 SMA 扭转驱动器连接外侧机翼部分,其可用于飞行和地面操纵。在飞行中,驱动部分能够提高横向方向稳定性,图 10 为 SAW 示意图。

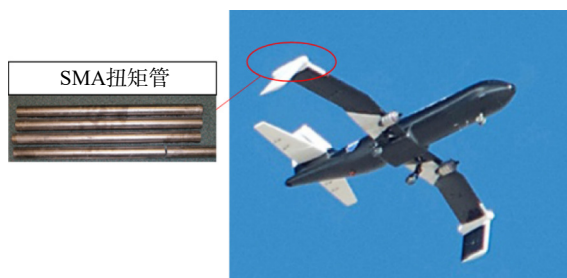


图 10 展向自适应机翼(SAW)^[81]

Fig. 10 Spanwise adaptive wing (SAW)^[81]

SMA 扭转驱动器的优点是同时具有传感与驱动功能。将 SMA 扭转驱动器与被扭转结构连接后,加热后直接输出扭矩,降低了扭转驱动结构的复杂性。

3.2.3 径向密封结构

相比于直线与扭转驱动器,SMA 管径向密封结构的应用是最早的。SMA 管径向密封主要应用于管接头,将 SMA 管先在低温下扩大内径,然后加热收缩完成对管路的密封。

管接头工作原理示意如图 11 所示。使用时,先对 SMA 管进行扩径,然后将被连接管对接并插入 SMA 管接头内,对 SMA 管进行加热,SMA 管受热收缩并压紧被连接管,完成密封固定。SMA 管接头很好地利用了 SMA 的形状记忆特性,其密封性能好,可靠性高。20 世纪 70 年代,美军

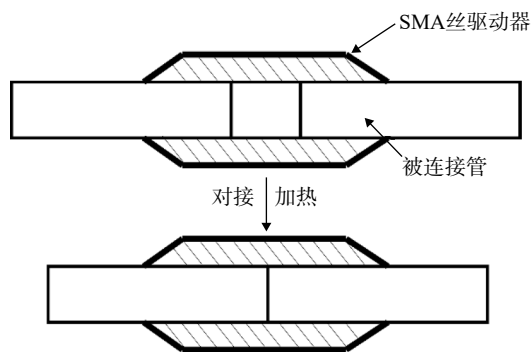


图 11 SMA 管接头

Fig. 11 SMA pipe joint

F14 战斗机管接头上第一次实现了 SMA 的航空工业应用^[9-10]。此后,SMA 管接头的应用拓展到了石油行业,其材料体系也更加丰富,包括 Fe 基、Cu 基记忆合金材料等均有广泛的应用^[82]。

SMA 管接头的可靠性很高,安装简单,相比于传统焊接方法,其可以连接不同材料的管子,因此使用频率很高,应用较为成熟。

3.3 SMA 弹簧

SMA 弹簧的特点是输出力和位移大,其克服了 SMA 管直线驱动器输出位移小的缺陷,并可加工成不同的直径与高度,以满足不同驱动器的驱动位移要求。作为触发结构,SMA 弹簧受热变形后产生回复变形对外输出驱动力,驱动相应结构运动。

多个研究机构开展了针对 SMA 弹簧驱动的压紧释放机构研究。韩国航天大学的 Tak 等^[83]研制了采用 SMA 弹簧驱动的压紧释放机构。美国洛克希德·马丁公司采用 SMA 弹簧研制了基于钢球解锁原理的 LFN(low force nut)和基于二级分瓣螺母原理的 TSN(two-stage nut)的压紧释放机构^[84-85]。图 12 为 LFN 机构示意图,机构释放时,对 SMA 驱动弹簧通电,其受热伸长,驱动活塞向下移动,钢球落入凹槽内,驱动弹簧驱动箍环向上移动,解除对分瓣螺母的径向约束,螺栓完成释放。复位时,对 SMA 复位弹簧通电,其推动箍环向下移动,使得分瓣螺母重新合拢,完成复位。

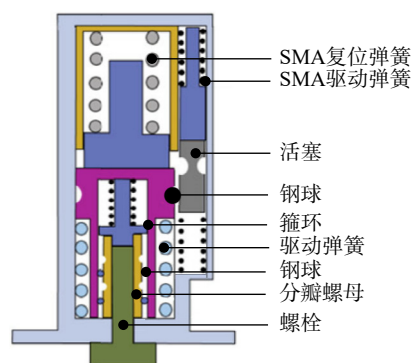


图 12 LFN 机构^[84-85]

Fig. 12 LFN mechanism^[84-85]

SMA 弹簧驱动的压紧释放机构性能参数如表 2 所示。SMA 弹簧驱动的压紧释放机构兼具弹簧与 SMA 形状记忆效应的优势,用相对较小的微观应变产生较大的宏观位移。但 SMA 弹簧横截面上的应力分布不是恒定的,因此需要更大的体积来产生相同的力,这对驱动器的效率和带

表 2 SMA 弹簧驱动的压紧释放机构
Table 2 SMA spring driving hold-down and
release mechanism

型号	载荷/ kN	释放时间/ s	质量/ g	包络尺寸/ (mm×mm)
LFN	12~13	10	250	38×89(直径×高度)
TSN	25~80	0.05	300	38×76(直径×高度)
KAU	1.597	0.022		50×30(长度×宽度)

宽有负面影响(即对于相同的输出,必须加热和冷却更大的材料体积)。

3.4 SMA 带

SMA 带的平面面积较大,可与其他平面结构贴合,通过电流或温度控制 SMA 带受热作动,实现弯曲变形功能。其特点是驱动力大,输出角度较大。相比于常见的电动机驱动的弯曲折叠机构,SMA 带可以直接用于弯曲驱动,结构大幅度简化。

SMA 带的弯曲驱动已经应用到多个场景中。NASA 研制了采用 SMA 带的太阳翼帆板折叠展开铰链^[86],目前已经于 2002 年在 NASA 的地球观测 1 号卫星上实现轨测试验证。波音公司研制的可变形锯齿结构(variable geometry chevron, VGC)是采用 SMA 带驱动的主动降噪驱动器^[71, 73],图 13 为 VGC 在飞机中的安装位置及结构示意图。2005 年,波音公司在 ANA(all Nippon airway) 777-300ER 的 GE90-115B 发动机上进行了测试,对起飞、巡航条件下的 VGC 性能进行评估,结论是其可以显著地降低起飞阶段的噪声,有效地降低巡航阶段的冲击室的噪声。2011 年, Pecora 等^[87]在 CS-25 支线飞机上设计并测试了一种采用 SMA 带驱动的变形后缘结构,实现了后缘部分的连续变化。2018 年, Leal 等^[88]采用集成设计方法设计了一种 SMA 驱动器驱动的变形机翼结构。

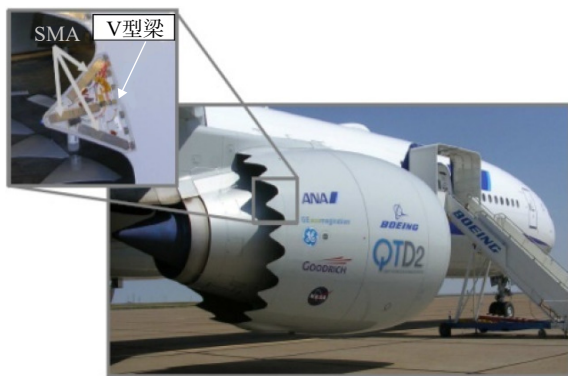


图 13 VGC 示意图^[71]

Fig. 13 VGC Schematic diagram^[71]

SMA 带用作弯曲驱动器,可以根据温度变化自主调节变形量,大大简化了结构。SMA 带在应用中也存在不足:由于热滞后的存在,在实际使用中,需要设计复杂的控制方案。

4 超弹性应用

超弹性是 SMA 的另一突出力学特性,随着航空航天对于抗振动冲击、抵抗大变形等需求增多,SMA 的超弹性特性受到了越来越多的关注。SMA 相变产生的可回复变形远大于普通材料的弹性变形,因此可用于需要较高弹性变形的场合。根据 SMA 超弹性的特点,其常见的应用有两类:一是利用超弹性的吸能减振作用设计减振器,二是利用大变形回复性能设计自适应结构。

4.1 吸能减振

在航空航天领域,结构受到振动冲击是一个常见的现象。采用 SMA 材料设计的减振装置,可以充分利用 SMA 的超弹性,其在受到冲击时产生的超大滞回圈可以充分地吸收振动冲击的能量,从而达到减振的目的。

SMA 吸能减振作用主要用于设计减振装置。韩国航天研究所研制了一型 SMA 隔振器^[89],其通过控制隔振器的预压缩位移实现对隔振器隔振能力和固有频率调整。Kwon 等^[90]研制了 SMA 金属丝网减振器,其可以降低基体振动对成像卫星系统的影响。北京航空航天大学智能推进实验室研制了 SMA 拟橡胶金属减振器^[6, 58],图 14 为 SMA 拟橡胶金属减振器组成示意图,其采用对称分布的、性能完全相同的两个超弹性 SMA 丝构成的拟橡胶金属元件作为阻尼元件。其最大可恢复变形达到 30%,对宽频带随机载荷有很好的减振能力。

SMA 设计的减振器很好地利用了 SMA 材料的超弹性,在受到外界振动冲击时,可以很好地

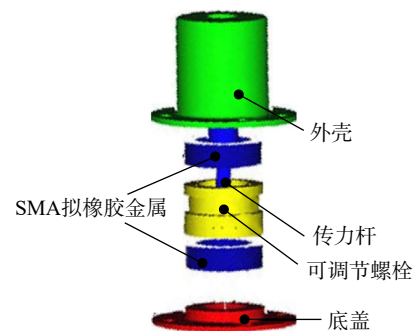


图 14 拟橡胶金属减振器^[58]

Fig. 14 Imitated rubber metal shock absorber^[58]

吸收能量并具有优异的减振效果。目前的 SMA 减振器、阻尼器耗能效率较低、结构较复杂,未来应结合准确、简单高效的 SMA 超弹性本构模型,设计更加简单、效率高的装置^[60]。

4.2 大变形回复

SMA 超弹性还可以用于弹性变形要求较高的场景。SMA 在加载过程中会发生相变,产生较大的变形,在卸载后仍然能完全回复,这一特点完全不同于常见的弹性材料。因此,利用 SMA 超弹性可以产生大变形并完全回复的特点,可用于需要产生大变形并完全回复的自适应结构中。

利用 SMA 超弹性设计的自适应结构在多个领域均有应用。杜彦良等^[91]提出利用 SMA 的超弹性设计 SMA 螺栓,可以实现多个螺栓连接同一系统时载荷的自适应分配。NASA 针对火星探测任务中由于不平整路面导致火星车探测器轮胎出现永久变形的问题,提出了新型的 SMA 超弹性轮胎^[92]。图 15 为 NASA 火星车轮胎示意图,该轮胎采用数百条相互缠绕的超弹性 SMA 丝编织而成,替代曾经使用的弹簧轮胎。SMA 可以承受的弹性变形约为钢材的 30 倍,因此可以克服弹簧轮胎导致的塑性变形问题。

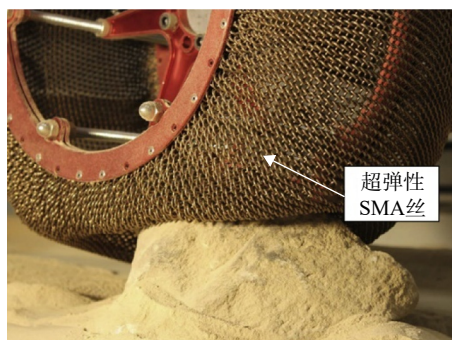


图 15 NASA 火星车轮胎^[92]

Fig. 15 NASA Mars rover tires^[92]

利用 SMA 超弹性可产生大变形回复的特点设计的自适应结构可以很好地适应环境的变化。但在应用中还需要考虑 SMA 的疲劳及其他性能的衰减。

5 未来趋势

随着材料、工艺、控制、信息技术的发展,SMA 在航空航天领域的应用将更广泛;在研究方面,体现出更强的多学科交叉和融合特征。主要有以下 4 个方面:

1) 材料与工艺。随着 SMA 在不同温度环境

中应用,未来的 SMA 材料体系应该更加丰富,以满足不同使用环境温度下的要求。目前,SMA 材料在环境温度低于 75 ℃ 时的研究与应用已经较为完善,SMA 在高温环境下的研究与应用还较少。针对航空航天的高温需求,添加 Hf 和 Zr 的三元 NiTi 高温 SMA 已经展现出较大的应用价值。此外,通过传统工艺如热处理、热机械训练或新型工艺如电流脉冲处理等手段有利于 SMA 获得稳定的形状记忆、超弹性等性能。在 3D 打印方面,原料粉末的质量和设备的温度控制等技术需要更深入的研究。

2) 本构模型。随着 SMA 在航空航天以及高温、复杂载荷环境下的应用越来越多,未来的本构模型还需考虑疲劳、高温、腐蚀等多种因素。针对 SMA 常见的 5 种变形机制,包括马氏体相变、相变诱导塑性、塑性变形、双程记忆效应和拉压不对称性,需要发展可以准确描述以上变形机制的统一的宏观本构模型,进行 SMA 驱动器的一体化优化设计。针对多晶 SMA 应用的增加,需要发展针对多晶 SMA 变形机制进行直接描述的细观本构模型。

3) 形状记忆效应应用。采用不同结构形式的 SMA,可以设计结构紧凑、可靠性高的驱动器,当前的驱动器普遍存在的问题主要是机构的自动化、智能化水平不高。未来的重点研究方向包括①设计新颖的自复位快速连接机构,实现压紧释放机构的快速释放与复位,提高 SMA 应用的智能化水平;②设计新型自适应结构,开展针对不同温度、不同载荷环境下的应用研究,增加机构健康状态检测模块。

4) 超弹性应用。SMA 超弹性的应用,一方面是从材料角度提升基础性能,另一方面主要是通过结构形式的多样化,更好地发挥超弹性的应用价值。未来需要结合航空航天领域的应用特点,重点开展两方面的研究:一是设计更加新颖的结构形式;二是开展超弹性 SMA 循环稳定性和长寿命应用研究。

6 结 论

本文介绍了形状记忆合金在航空航天领域的应用研究进展,得到如下结论:①随着三元 NiTi 合金材料的研究发展,NiTiHf、NiTiHfZr 的相变温度达到 150 ℃,满足了诸如航天器舱外环境等高温条件下的使用需求,拓宽了 SMA 的应用范围;

热处理工艺的发展使得 SMA 力学性能得到提升, 满足了航空航天对功能部件轻量化和小型化的需求; 3D 打印工艺的发展实现了利用 SMA 制造复杂功能结构的目标, 在着陆缓冲等领域展示了较强的应用潜力。②本构模型的发展使得对 SMA 相变行为的数学描述更加准确, 驱动器设计分析的准确度得到有效提升。③利用形状记忆效应可制造多种结构形式的驱动器, 其通常具有结构紧凑、控制简便、低功耗高输出的特点, 使得其在对空间、功耗利用率以及自动化控制要求较高的航空航天领域得到广泛应用, SMA 驱动器呈现出轻量化、自动化和智能化的发展趋势, 未来其性能优势将进一步提升。④利用超弹性可制造成特定形式的功能结构, 在吸能减振和大变形回复场合得到应用, 这类功能结构呈现出构型多样化的发展趋势。总体来看, SMA 在航空航天领域的应用研究将向着更宽的工作温度范围、更准确全面的本构模型、更多样的结构形式、更智能的作动机构方向发展。

参考文献:

- [1] ÖLANDER A. An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1932, 54(10): 3819-3833.
- [2] CHANG L C, READ T A. Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals-the gold-cadmium beta phase[J]. *Transactions of AIME Journal of Metals*, 1951, 47(191): 47-52.
- [3] BUEHLER W J, GILFRICH J V, WILEY R C. Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(5): 1475-1477.
- [4] 刘永康, 蒋娜云, 李微. 铜基形状记忆合金专利技术分析[J]. *中国科技信息*, 2018(11): 29-30.
LIU Yongkang, JIANG Nayun, LI Wei. Analysis of patent technology of copper base shape memory alloy[J]. *China Science and Technology Information*, 2018(11): 29-30. (in Chinese)
- [5] 任彦. 铁基形状记忆合金研究与应用的新进展[J]. *新材料产业*, 2014(6): 42-45.
REN Yan. New progress in research and application of iron - based shape memory alloys[J]. *Advanced Materials Industry*, 2014(6): 42-45. (in Chinese)
- [6] 闫晓军, 张小勇. 形状记忆合金智能结构[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [7] STÉPHANE L. Issues in the design of shape memory alloy actuators[D]. Cambridge, US: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [8] HOLLERBACH J M, HUNTER I W, BALLANTYNE J. A comparative analysis of actuator technologies for robotics[M]. Cambridge, US: Massachusetts Institute of Technology (MIT) Press, 1992.
- [9] LIU D Z, LIU W X, GONG F Y. Engineering application of Fe-based shape memory alloy on connecting pipe line[J]. *Journal De Physique: IV*, 1995, 5(C8): 1241-1246.
- [10] 谷凡, 张玲, 王伟, 等. 形状记忆合金管道连接件综述[J]. *建筑与预算*, 2017(12): 30-37.
GU Fan, ZHANG Ling, WANG Wei, et al. A review of shape memory alloy pipe fittings[J]. *Construction and Budget*, 2017(12): 30-37. (in Chinese)
- [11] HARTL D J, LAGOUDAS D C. Aerospace applications of shape memory alloys[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2014, 221(4): 535-552.
- [12] HUMBEECK J V. Non-medical applications of shape memory alloys[J]. *Materials Science Engineering: A*, 1999, 273/274/275: 134-148.
- [13] MCDONALD S L. Shape memory alloy applications in space systems[J]. *Materials Design*, 1991, 12(1): 29-32.
- [14] YAMAUCHI K, OHKATA I, TSUCHIYA K, et al. Shape memory and superelastic alloys: technologies and applications[M]. Sawston Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2011.
- [15] FRANK S, SUBHASH G. The effect of alloy formulation on the transformation temperature range of Ni-Ti shape memory alloys[C]// *Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST-2003)*. New Hartford, US: Special Metals Corporation, 2004: 13413.1-13413.9.
- [16] 李涛, 易忠, 高鸿. 航天器材料空间环境适应性评价技术[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(3): 37-40.
LI Tao, YI Zhong, GAO Hong. Summarization space environmental worthiness evaluation technology for spacecraft material[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(3): 37-40. (in Chinese)
- [17] KARAKOC O, ATLI K C, BENAFAN O, et al. Actuation fatigue performance of NiTiZr and comparison to NiTiHf high temperature shape memory alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 829: 142154.1-142154.9.
- [18] KARAKOC O, HAYRETTIN C, CANADINC D, et al. Role of applied stress level on the actuation fatigue behavior of NiTiHf high temperature shape memory alloys[J]. *Acta Materialia*, 2018, 153: 156-168.
- [19] MONROE J A, KARAMAN I, LAGOUDAS D C, et al. Determining recoverable and irrecoverable contributions to accumulated strain in a NiTiPd high-temperature shape memory alloy during thermomechanical cycling[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(2): 123-126.
- [20] CASALENA L, BIGELOW G S, GAO Y, et al. Mechanical behavior and microstructural analysis of NiTi-40Au shape memory alloys exhibiting work output above 400 °C[J]. *Intermetallics*, 2017, 86: 33-44.
- [21] DREXEL M, SELVADURAY G, PELTON A. The effects of cold work and heat treatment on the properties of nitinol wire[R]. Irvine, US: the 2nd ASME Frontiers in Biomedical Devices Conference, 2007.
- [22] KOK M, DAGDELEN F, AYDOGDU A, et al. The change of transformation temperature on NiTi shape memory alloy by pressure and thermal ageing[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2016, 667(1): 012011.1-012011.8.
- [23] BENAFAN O, MOHOLT M. Spanwise adaptive wing: an overview and challenges of in-flight wing folding using shape memory alloys[R]. Konstanz, Germany: the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST), 2019.
- [24] BENAFAN O, NOEBE R D. Shape memory alloy rock splitters (SMARS): US9649780B1 [P]. 2017-05-16.

- [25] BENAFAN O, NOEBE R D, HALSMER T J. Shape memory alloy rock splitters (SMARS): a non-explosive method for fracturing planetary rocklike materials and minerals[R]. NASA/TM-2015-218832, 2015.
- [26] BENAFAN O, NOEBE R D, HALSMER T J. Static rock splitters based on high temperature shape memory alloys for planetary explorations[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 118: 137-157.
- [27] RAO Zhixiang, WANG Xiaoyuan, LENG Jiaming, et al. Design methodology of the Ni50Ti50 shape memory alloy beam actuator: heat treatment, training and numerical simulation[J]. *Materials and Design*, 2022, 217: 110615-110630.
- [28] YAN Xiaojun, HUANG Dawei, ZHANG Xiaoyong. Note: a novel curvature-driven shape memory alloy torsional actuator[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(12): 126109.1-126109.4.
- [29] LIU Xiaopeng, WANG Yinong, QI Min, et al. Effects of heat treatment on shape-setting and non-linear mechanical properties of Nitinol stent[C]// *Proceedings of International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering*. Harbin, China: SPIE (Society of Photo-optical Instrumentation Engineers), 2007: 64233.1-64233.7.
- [30] MAHMUD A S, HONG Y, TEE S, et al. Effect of annealing on deformation-induced martensite stabilisation of NiTi[J]. *Intermetallics*, 2008, 16(2): 209-214.
- [31] BEN F B, GAHBICHE A, ZGHAL S, et al. On the influence of the heat treatment temperature on the superelastic compressive behavior of the Ni-rich NiTi shape memory alloy[J]. *Journal of Materials Engineering Performance*, 2017, 26: 5660-5668.
- [32] 胡励. NiTi形状记忆合金包套压缩塑性变形机理及局部非晶化机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- HU Li. Investigation of plastic deformation mechanism and local amorphization mechanism of NiTi shape memory alloy based on canning compression[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017. (in Chinese)
- [33] DADBAKHS S, SPEIRS M, KRUTH J, et al. Effect of SLM parameters on transformation temperatures of shape memory Nickel Titanium parts[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2014, 16(9): 1140-1146.
- [34] NEMATOLLAHI M, TOKER G, SAGHAIAN S E, et al. Additive manufacturing of Ni-rich NiTiHf20: manufacturability, composition, density, and transformation behavior[J]. *Shape Memory Superelasticity*, 2019, 5: 113-124.
- [35] XIONG Zhiwei, LI Meng, HAO Shijie, et al. 3D-printing damage-tolerant architected metallic materials with shape recoverability via special deformation design of constituent material[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2021, 15(33): 39915-39924.
- [36] 何贝贝. 选区激光熔化TiNi形状记忆合金热—力耦合数值模拟及实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- HE Beibei. Numerical simulation and experimental investigation on thermal-mechanical behavior during selective laser melting of Ti Ni shape memory alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [37] ARGHAVANI J. Thermo-mechanical behavior of shape memory alloys under multiaxial loadings: constitutive modeling and numerical implementation at small and finite strains[D]. Teheran, Iran: Sharif University of Technology, 2010.
- [38] 张小勇. 用于疲劳寿命预测的SMA本构模型及其工程应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2012.
- ZHANG Xiaoyong. Development and applications of a SMA constitutive model for actuators fatigue life prediction[D]. Beijing: Beijing University, 2012. (in Chinese)
- [39] TANAKA K, KOBAYASHI S, SATO Y. Thermomechanics of transformation pseudoelasticity and shape memory effect in alloys [J]. *International Journal of Plasticity*, 1986, 2(1): 59-72.
- [40] LIANG C, ROGERS C. One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1990, 1(2): 207-234.
- [41] BRINSON L. One-dimensional constitutive behavior for shape memory alloys[J]. *Materials and Design*, 2002, 23(1): 11-19.
- [42] ZHANG Xiaoyong, YAN Xiaojun, XIE Huimin, et al. Modeling evolutions of plastic strain, maximum transformation strain and transformation temperatures in SMA under superelastic cycling[J]. *Computational Materials Science*, 2014, 81: 113-122.
- [43] LAGODAS D C, ZHONGHE B O, QIDWAI M A. Unified thermodynamic constitutive model and finite element analysis of active metal matrix composites[J]. *The International Society for Optical Engineering*, 1995, 3(2): 153-179.
- [44] QIDWAI M A, LAGODAS D C. Numerical implementation of a shape memory alloy thermomechanical constitutive model using return mapping algorithms[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2000, 47(6): 1123-1168.
- [45] HARTL D J, LAGODAS D C. Constitutive modeling and structural analysis considering simultaneous phase transformation and plastic yield in shape memory alloys[J]. *Smart Materials Structures*, 2009, 18(10): 104017.1-104017.32.
- [46] MIRZAEIFAR R, DESROCHES R, YAVARI A, et al. On superelastic bending of shape memory alloy beams[J]. *International Journal of Solids Structures*, 2013, 50(10): 1664-1680.
- [47] XU L, SOLOMOU A, BAXEVANIS T, et al. Finite strain constitutive modeling for shape memory alloys considering transformation-induced plasticity and two-way shape memory effect[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 221: 42-59.
- [48] 于超. NiTi形状记忆合金宏细观热-力耦合循环本构模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- YU Chao. Thermo-mechanically coupled macro-and micro-scopic constitutive models of NiTi shape memory alloy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [49] PATOOR E, EBERHARDT A, BERVEILLER M. Micromechanical modelling of superelasticity in shape memory alloys[J]. *Journal de Physique: IV*, 1996, 6(C1): 277-292.
- [50] THAMBURAJA P, ANAND L. Polycrystalline shape-memory materials: effect of crystallographic texture[J]. *Journal of the Mechanics Physics of Solids*, 2001, 49(4): 709-737.
- [51] THAMBURAJA P, ANAND L. Superelastic behavior in tension-torsion of an initially-textured Ti-Ni shape-memory alloy[J]. *International Journal of Plasticity*, 2002, 18(11): 1607-1617.
- [52] GALL K, SEHITOGLU H. The role of texture in tension-compression asymmetry in polycrystalline NiTi[J]. *International Journal of Plasticity*, 1999, 15(1): 69-92.
- [53] 朱祎国, 张杨, 赵聃. 多晶NiTi形状记忆合金相变的细观力学本构模型[J]. *金属学报*, 2013, 49(1): 123-128.
- ZHU Yiguo, ZHANG Yang, ZHAO Dan. Micromechanical constitutive model for phase transformation of NiTi polycrystal SMA[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 49(1): 123-128. (in Chinese)
- [54] MIRZAEIFAR R, DESROCHES R, YAVARI A, et al. A micromechanical analysis of the coupled thermomechanical superelastic response of textured and untextured polycrystalline NiTi shape memory alloys[J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(12): 4542-4558.
- [55] GRAESSER E J, COZZARELLI F A. A proposed three-dimension-

- al constitutive model for shape memory alloys[J]. *Journal of Intelligent Material Systems Structures*, 1994, 5(1): 78-89.
- [56] WEN Y K. Method for random vibration of hysteretic systems[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1976, 102(2): 249-263.
- [57] WEN Y K. Equivalent linearization for hysteretic systems under random excitation[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(1): 150-154.
- [58] 闫晓军. 随机载荷下SMA减振器及磁吸振器理论与试验研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.
- YAN Xiaojun. Theoretical and experimental study on SMA damper and magnetic vibration absorber under random excitation[D]. Beijing: Beihang University, 2000. (in Chinese)
- [59] 张景业. 超弹性形状记忆合金混杂复合材料振动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- ZHANG Jingye. Study on vibration of superelastic shape memory alloy hybrid composite structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [60] 牛健. 新型SMA-SMP阻尼装置对风电塔结构的减震研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2021.
- NIU Jian. Research on seismic response reduction of wind turbine tower structures using new SMA-SMP damping device[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [61] GARDI R. Final improvements and tests on a SMA actuated, lightweight mechanism for microsatellite[R]. Bremen, Germany: the 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation and the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law, 2003.
- [62] YAN Xiaojun, HUANG Dawei, ZHANG Xiaoyong, et al. A one-stage, high-load capacity separation actuator using anti-friction rollers and redundant shape memory alloy wires[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86: 125005.1-125005.8.
- [63] OKAIE M D, BUSCH J D, JOHNSON A D, et al. Release device for retaining pin: US5771742 [P]. 1998-06-30.
- [64] YOO Y I, JEONG J W, LIM J H, et al. Development of a non-explosive release actuator using shape memory alloy wire[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(1): 015005.1-015005.8.
- [65] VÁZQUEZ J, BUENO J I. Non explosive low shock reusable 20 kN Hold-down release actuator[R]. Liege, Belgium: the 9th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 2001.
- [66] NAVA N, COLLADO M, CABÁS R. REACT: resettable hold down and release actuator for space applications[J]. *Journal of Materials Engineering Performance*, 2014, 23(7): 2704-2711.
- [67] COLLADO M, RIVERA C, INES J. Evolution of a resettable hold-down and release actuator based on SMA technology[R]. Munich, Bavaria, Germany: the 18 European Space Mechanisms and Tribology Symposium, 2019.
- [68] 张小勇, 闫晓军, 杨巧龙. 形状记忆合金分瓣螺母空间解锁机构的设计与试验研究[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(17): 145-150.
- ZHANG Xiaoyong, YAN Xiaojun, YANG Qiaolong. Design and experimental research of a shape memory alloy space release device with segmented nut form[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(17): 145-150. (in Chinese)
- [69] HUANG Dawei, YAN Xiaojun, ZHANG Xiaoyong, et al. Note: A SMA wire actuated extremely long-lifetime release actuator using two ball-lock mechanisms[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(5): 056107.1-056107.3.
- [70] RAO Zhixiang, YAN Xiaojun, ZHANG Xiaoyong, et al. Detailed design and life prediction methodology of novel SMA actuated repeatable launch locking protective device (RLLPD) for magnetically suspended flywheel (MSFW)[J]. *Smart Materials Structures*, 2021, 30(5): 057001-057017.
- [71] CALKINS F T, MABE J H. Shape memory alloybased morphing aerostructures[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2010, 132(11): 111012.1-111012.7.
- [72] 谭慧俊, 王子运, 张悦. 形状记忆合金在飞行器进气道中的应用研究进展[J]. *南京航空航天大学学报*, 2019, 51(4): 438-448.
- TAN Huijun, WANG Ziyun, ZHANG Yue. Review of Applications of shape memory alloy in Inlets[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2019, 51(4): 438-448. (in Chinese)
- [73] COSTANZA G, TATA M E. Shape memory alloys for aerospace, recent developments, and new applications: A short review[J]. *Materials*, 2020, 13(8): 1856.1-1856.16.
- [74] ASHIR M, HINDAHL J, NOCKE A, et al. Development of an adaptive morphing wing based on fiber-reinforced plastics and shape memory alloys[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2020, 50(1): 114-129.
- [75] MCKINNIS D N. Fastening apparatus having shape memory alloy actuator: US5160233 A [P]. 1992-11-03.
- [76] KAISER F. Shape memory alloy (SMA)[J]. *Fkaiserpbworks*, 1998, 64(1): 44-46.
- [77] BUSCH J D, BOKAIE M. Implementation of heaters on thermally actuated spacecraft mechanisms[R]. Cleveland, US: the 28th Aerospace Mechanisms Symposium, 1994.
- [78] BUSCH J D, PURDY W E, JOHNSON A D. Development of a non-explosive release device for aerospace applications[R]. Greenbelt, US: the 26th Aerospace Mechanisms Symposium, 1992.
- [79] RUGGERI R T, BUSSOM, R. C., AND ARBOGAST, D. J. Development of a 1/4-scale nitinol actuator for reconfigurable structures[C]// *Proceedings of Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. San Diego, US: SPIE (Society of Photo-optical Instrumentation Engineers), 2008: 69300L. 1-69300L. 12.
- [80] HERRINGTON J S, HODGE L H, STEIN C A, et al. Development of a twisting wing powered by a shape memory alloy actuator[R]. Kissimmee, US: the 23rd AIAA/AHS Adaptive Structures Conference AIAA Journal, 2015.
- [81] BENAFAN O. Spanwise adaptive wing[EB/OL]. [2022-06-29]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170009544/downloads/20170009544.pdf>.
- [82] 王焱, 李春福, 林元华, 等. SMA在石油工程中的应用研究进展[J]. *材料导报: 纳米与新材料专辑*, 2016, 30(S2): 98-102, 107.
- WANG Yao, LI Chunfu, LIN Yuanhua, et al. Research progress of application of SMA in petroleum engineering[J]. *Materials Review*, 2016, 30(S2): 98-102, 107. (in Chinese)
- [83] TAK W, LEE M, KIM B. Ultimate load and release time controllable non-explosive separation device using a shape memory alloy actuator[J]. *Journal of Mechanical Science Technology*, 2011, 25(5): 1141-1147.
- [84] CARPENTER B F. Shape memory actuated release devices[C]// *Proceedings of Smart Structures and Materials 1996: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. San Diego, US: SPIE (Society of Photo-optical Instrumentation Engineers), 1996: 420-426.

- [85] PEFFER A, DENOYER K, FOSNESS E, et al. Development and transition of low-shock spacecraft release devices[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Big Sky, US: IEEE, 2000: 277-284.
- [86] CARPENTER B, LYONS J. Validation report for the EO-1 lightweight flexible solar array experiment[R]. Greenbelt, US: EO-1 Technology Infusion Forum, 2001.
- [87] PECORA R, BARBARINO S, CONCILIO A, et al. Design and functional test of a morphing high-lift device for a regional aircraft [J]. *Journal of Intelligent Material Systems Structures*, 2011, 22(10): 1005-1023.
- [88] LEAL P B, SAVI M A, HARTL D J. Aero-structural optimization of shape memory alloy-based wing morphing via a class/shape transformation approach[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 232(15): 2745-2759.
- [89] YOUN S H, JANG Y S, HAN J H, et al. Compressed mesh washer isolators using the pseudoelasticity of SMA for pyroshock attenuation[J]. *Journal of Intelligent Material Systems Structures*, 2010, 21(4): 407-421.
- [90] KWON S C, JEON S H, OH H U. Performance evaluation of spaceborne cryocooler micro-vibration isolation system employing pseudoelastic SMA mesh washer[J]. *Cryogenics*, 2015, 67: 19-27.
- [91] 杜彦良, 赵维刚, 刘献栋, 等. 自动均载传力件的调节特性分析[J]. *航空动力学报*, 1999, 14(1): 51-54.
DU Yanliang, ZHAO Weigang, LIU Xiandong, et al. Regulation behavior analysis of auto-even-load connecting component.[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1999, 14(1): 51-54. (in Chinese)
- [92] PADULA S, CREAGER C. Shape memory alloy (SMA) tires: a new paradigm in tire performance[R]. Akron, US: the 7th Annual Meeting and Conference on Tire Science and Technology, 2018.

(编辑: 王碧珺)