

文章编号: 1001-4888(2022)04-0517-11

基于形状记忆合金的超弹性 复合板驱动与回复响应研究^{*}

刘旭, 朱增辉, 李旭, 刘记立

(武汉理工大学, 新材料力学理论与应用湖北省重点实验室, 湖北武汉 430070)

摘要: 为研究基于形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)的超弹性复合板驱动与回复响应, 开展了一系列 NiTi 丝/硅橡胶复合材料板的弯曲-回复实验, 通过对比不同结构形式的复合板在不同温度条件下的加卸载力-位移曲线, 分析、探讨了 NiTi 丝直径、排布和组分占比对这类超弹性复合体系驱动-回复性能的影响及温度作用机理。立足于实验结果, 在现有水平下提出了一种 SMA 与橡胶材料复合制作、通电加热式驱动、响应时间短的可折叠/展开翼板。研究结果表明, 温度诱发的 SMA 内部相变可充分发挥其形状记忆效应, 且同一温度下, 合金丝直径、数量和体积分数占比的增加均会改善 SMA/橡胶复合材料板的驱动-回复性能。在复合板承受弯曲加卸载的过程中, 橡胶基体应变能的储存与释放是促成整个体系变形回复的重要因素, 这一作用在低温状态, 即 SMA 并未体现出形状记忆效应时尤其显著。

关键词: 形状记忆合金; 橡胶超弹性; 弯曲-回复实验; 温度作用; 驱动机制

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-118

0 引言

形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)作为一种自适应驱动材料, 最突出的特性就是形状记忆效应(Shape Memory Effect)和超弹性效应(Pseudo-elastic Effect), 这都是因为在温度或载荷作用下材料内部发生马氏体与奥氏体相变或逆相变的结果^[1]。伴随着智能驱动技术的深入研究与发展, SMA 材料与其他材料的结合在各个领域受到了人们的广泛关注, 也发挥了越来越多的作用^[1-3]。目前常见的做法是将 SMA 与金属、树脂或混凝土等进行复合, 以便利用其智能属性实现自修复^[4], 这方面有关驱动效应的研究已比较成熟, 但传统智能材料往往处于较小的变形范围或工况。近年来有学者发现, 将 SMA 中的 NiTi 合金丝与橡胶组合成超弹性复合材料^[5-8], 利用橡胶基体良好的柔性和抗疲劳性, 并发挥 SMA 的主动控制作用, 能促成整个复合体系在较大变形下的回复响应^[10-12], 因此该材料展现了较突出的应用前景。

一些学者经过探索发现, SMA 与橡胶复合而成的构件在柔性驱动领域的应用价值很大, 与传统刚性结构相比, 柔性结构具有良好的弯、扭特性, 对空间的适应能力更好^[13]。Feng 等^[14]利用 SMA 丝和橡胶制成了多功能复合材料板, 该板材不仅可以实现面内和面外的双重变形, 还可以通过改变环境温度来调节刚度, 以满足不同的场景需求。Stirling 等^[15]采用弹簧型 SMA 丝嵌入软材料中, 设计研究出了一种柔性的膝关节矫形器, 具有很高的灵活性和生物相容性。Li 等^[16]从自然界中软体动物的伸缩运动

^{*} 收稿日期: 2021-05-11; 修回日期: 2021-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(11502181、51974217)资助; 国家级大学生创新创业训练计划(S202010497136)资助

通信作者: 李旭(1982—), 男, 博士, 副教授。主要研究领域: 橡胶弹性体力学。Email: rasier@whut.edu.cn

得到灵感,利用弹性变形储存与释放能量的机理,设计了 SMA 与硅橡胶复合的周期性爬行和抓取驱动器。上述研究工作对基于形状记忆合金的超弹性器件设计带来很多启发,但由于橡胶基体明显的大变形、非线性和 SMA 较复杂的热力学相变特征,人们尚未系统掌握两者在温度作用下的回复响应与驱动机制,而这是进一步拓展 SMA/橡胶复合体系应用场景,使其满足更多需求的关键性因素。

为了考察基于形状记忆合金的超弹性复合板驱动性能与回复响应,本文设计、实施了不同结构的 SMA/橡胶板材在不同温度下的弯曲-回复实验,分别对比了不同温度条件和不同结构形式的 SMA/橡胶板材在弯曲-回复过程中的载荷-位移曲线。综合 SMA 丝的空间排布情况、体积占比情况以及所处的环境温度变化情况,分析了这些因素对 SMA 与橡胶弹性体组成复合体系的力学与驱动-回复特性的影响,此外还结合对 SMA 电阻特性的分析,提出了一种驱动方式较为简易可行、响应速度快的折叠翼模型,为相关器件的后续研究和开发提供了案例支持。

1 NiTi/硅橡胶复合板的试样制备

为了开发拥有良好弯、扭能力的柔性智能器件,一方面可考虑采用 SMA 中的 NiTi 合金丝作为关键部件,对构件的折叠/展开实现驱动或控制;另一方面,由于构件的折叠/展开过程往往伴随着剧烈弯曲(转动),且会重复多次,这就要求其具备优良的可回复弹性,因此考虑用硅橡胶来作为载体材料。故本文针对 SMA/橡胶复合结构的考察目标是可重复多次的驱动与回复响应。如图 1 所示,采用 NiTi 合金丝与超弹性硅橡胶制作折叠/展开复合板,板内放置平行排布的 NiTi 合金丝,收纳状态下复合板作两至三次折叠,当 NiTi 合金丝温度升高诱发内部相变时,该结构可由内向外有序展开。从实用性的角度而言,还应兼顾驱动方式简单易行和响应时间短这两方面的技术要求。

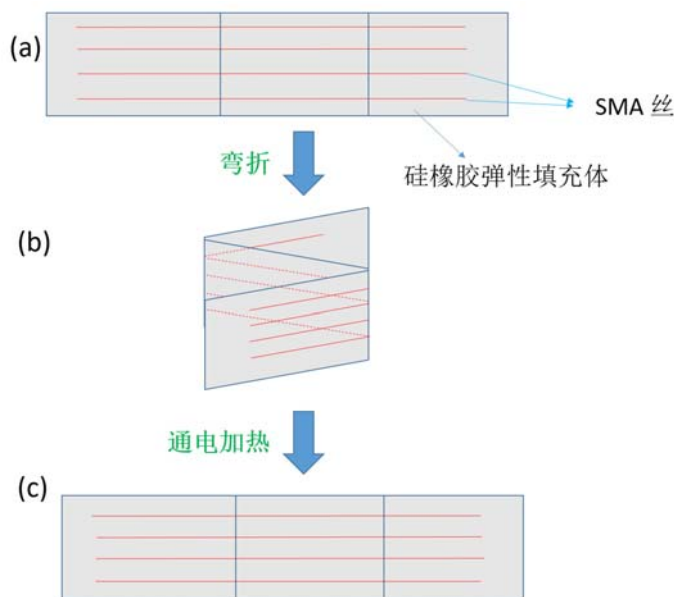


图 1 SMA 与超弹性橡胶组成的可折叠/展开复合板:(a)室温下展开状态;(b)室温下折叠状态;(c)高温下展开状态

Fig. 1 A foldable plate composed of SMA wire and hyper-elastic rubber matrix for actuating;

(a)unrolled at room temperature; (b)folded at room temperature; (c)expansion at high temperature

1.1 试样材料

本文研究的 SMA/橡胶复合材料组分之一为室温下体现出形状记忆效应的 NiTi 合金丝(直径为常用的 1.0mm 和 2.0mm),生产商是苏州川茂金属材料有限公司;组分为二为红叶公司提供的 HY-E625 型硅橡胶,该材料由 E625A、E625B 按质量 1:1 配比,这种超弹性材料具备优异的物理力学性能(包括高伸长率、抗撕裂、耐高温等)。

1.2 参数测定与试样制备

为了获得 SMA 材料的相变温度等关键参数,使用梅特勒-托利多公司的 DSC 3.0 系统,对重量为 40mg 的 NiTi 合金样品实施差示扫描量热分析实验(Differential Scanning Calorimeter,DSC)。采用从 -80°C 到 120°C 升降温的循环扫描方案(升降温速率均为 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$),得到其热流与温度的变化曲线(如图 2 所示)。基于这一实验结果,并依据 ASTM F2004 标准^[17],可确定无应力状态下该 SMA 材料的相变温度为 $M_s=6.02^{\circ}\text{C}$, $M_f=17.36^{\circ}\text{C}$, $A_s=53.27^{\circ}\text{C}$, $A_f=64.84^{\circ}\text{C}$ (M_s 、 M_f 分别为马氏体相变的开始和完成温度; A_s 、 A_f 分别为奥氏体相变的开始和完成温度)。

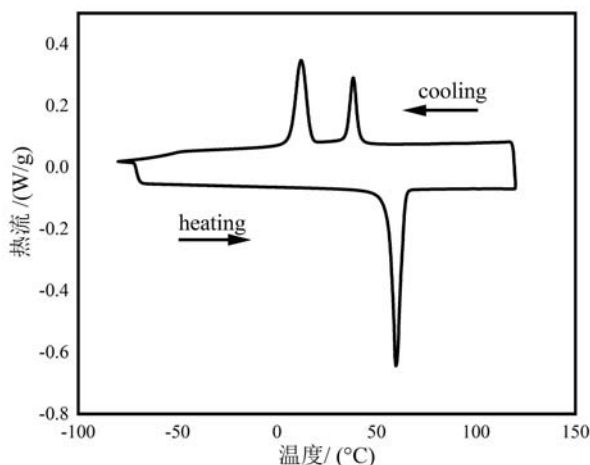


图2 NiTi 合金样品的 DSC 实验结果

Fig.2 DSC experiment results of NiTi alloy sample

在正式实验前,为消除金属丝的初始相变应变对结果的影响,将 180mm 长的金属丝在烘箱中以 80°C (大于 A_f) 的条件加热 20min,再将其置于低温环境(约 -18°C)冷却 1h 左右。这一处理可确保复合板中的 NiTi 合金成分处于完全马氏体相。

橡胶弹性体中 SMA 的结构与排布方式对复合板整体力学性能有着显著影响,要系统、全面地把握该体系在温度作用下的驱动-回复特征,有必要从 NiTi 合金丝的直径、数量以及体积分数占比等角度展开分析。为此,我们考虑了 4 种不同结构的复合材料板制备方案,如图 3 所示。其中,方案一为 4 根 1mm 合金丝均匀分布、体积分数占比 4% 的复合板;方案二为 4 根 1mm 合金丝均匀分布、体积分数占比 2% 的复合板;方案三为 7 根 1mm 合金丝均匀分布、体积分数占比 4% 的复合板;方案四为 4 根 2mm 合金丝均匀分布、体积分数占比 4% 的复合板。可见,各试样在厚度、丝的数量、丝的尺寸方面略有不同。

试样的制备过程分 3 步:首先,为保证实验的可靠性,将预先处理好的 SMA 丝两端穿过模具,使 SMA 丝尽可能与模具上孔洞的轴线重合;然后将事先配制好的硅橡胶 HY-E625(要注意消除气泡)浇注进模具中;最后让试样在室温下固化 36h 左右,脱模取出。图 3 给出了固化成形的 SMA/橡胶复合材料板的实物示意,图 4(a)为利用 3D 打印技术得到的树脂模具,图 4(b)是对应前述 4 种方案的 NiTi 丝/硅橡胶复合板成品。

2 NiTi/硅橡胶复合板的弯曲-回复实验

2.1 温度控制方案

本文通过高低温环境控制箱对试样进行温度控制,以考察温度对 NiTi/硅橡胶复合板弯曲-回复性能的影响。该方法操作简单,可保证材料受热均匀。依据 SMA 材料的相变温度测定值(见图 2),实验主要关注 3 个温度段,即 20°C (小于 A_s)、 60°C (介于 A_s 和 A_f 之间)、 100°C (大于 A_f) 下复合材料板的相关力学性能。如图 4(a)所示,将复合材料板置于环境温控箱中,通过温度调节按钮设置箱内温度,为确

保试样处于预设温度下,一般应保持恒温 30min 后再开始正式实验。

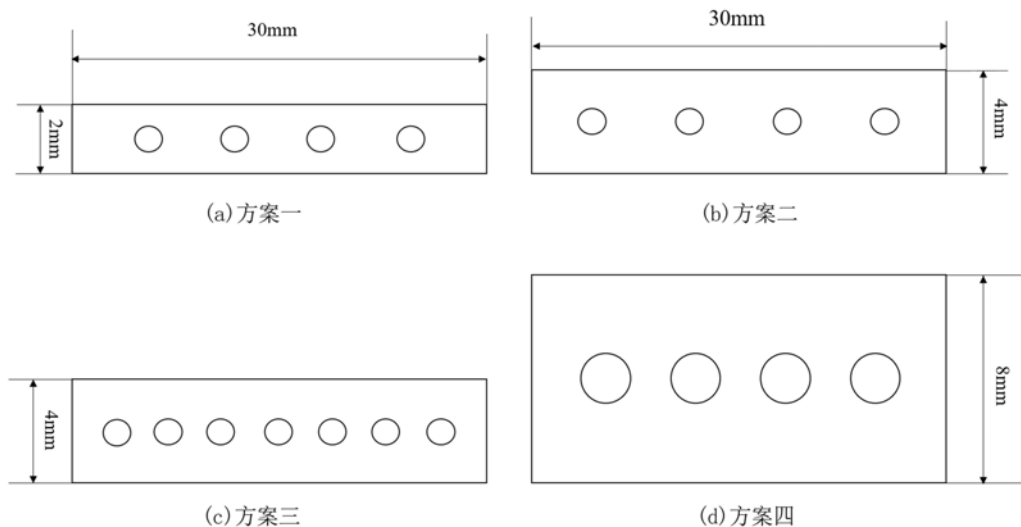


图 3 不同排布形式的复合材料板横截面示意图

Fig. 3 Cross-section schematic diagram of composite plates with different wire arrangements

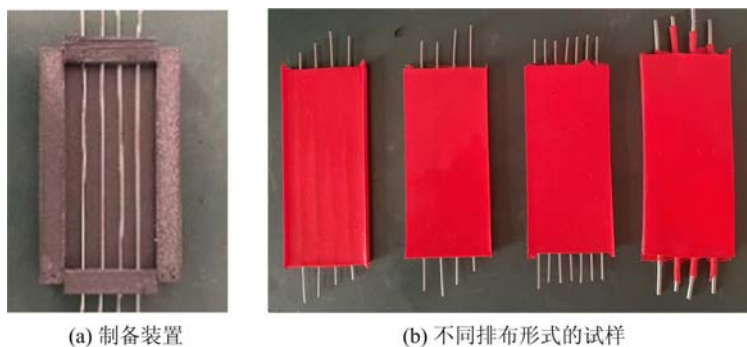


图 4 SMA/橡胶复合材料板制备装置及试样

Fig. 4 Preparation device and obtained specimen of different SMA/rubber composites

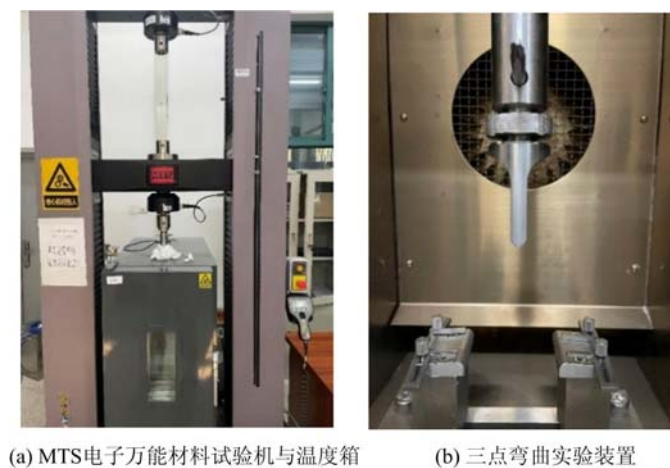


图 5 弯曲-回复实验设备

Fig. 5 The bending-recovery experimental setup

2.2 弯曲-回复实验

本文通过在 MTS 电子万能材料试验机(如图 5(a)所示)上开展弯曲-回复实验,来评价 NiTi/硅橡胶复合板受温度影响的驱动-回复性能。本文作者经前期的探索性实验发现,纯橡胶载体太软,SMA 丝

着力面积又太小,二者均无法独立进行弯曲-回复实验,但基于形状记忆合金的超弹性复合板综合了2种材料的优点,便可借助三点弯曲的方式来考察其驱动-回复响应特征。将试样固定在如图5(b)所示的弯曲实验装置上,试样跨距为64mm,装置的压头铅直向下移动,加载速率为2mm/min。根据预先设计好的4种结构体系和3种温度方案,测定不同温度下NiTi丝/橡胶复合材料板在弯曲10mm时产生的最大载荷以及卸载后产生的最大回复位移。

3 NiTi/硅橡胶复合板的弯曲-回复实验结果与驱动特性分析

3.1 温度作用下复合板弯曲-回复实验的结果分析

图6、图7给出了温度作用下各SMA/橡胶复合材料板的弯曲-回复实验结果,图中横轴为位移,表示试验机压头移动的距离,纵轴为载荷,表示加载过程中力传感器的读数。图6为不同温度、相同结构形式下复合板弯曲-回复过程的位移-载荷曲线。图6(a)为方案一的复合板实验结果,由图可看出,相变温度前(20℃、60℃)试样位移-载荷曲线的加载段几乎重合,存在载荷平台,最大弯曲载荷均接近5.22N,而相变温度后(100℃)位移-载荷曲线显著高于前两者,无明显的平台现象,最大弯曲载荷达到了17.32N;卸载时,相变温度前试样的最大回复位移分别为4.92mm、5.98mm,相变温度后则接近完全回复,这方面性能明显优于前两者。图6(b)为方案二的结果,在规律上与图6(a)展示的相同,只是载荷数值略有降低。图6(c)为方案三的复合板实验结果,由图可看出,随着温度的升高,试样位移-载荷曲线逐渐上升,但相变温度后(100℃)的试样抗弯能力明显优于相变温度前(20℃、60℃);卸载过程中,随着温度的升高,试样的回复性能也有所增强(最大回复位移逐渐增大)。图6(d)为方案四的结果,从图中

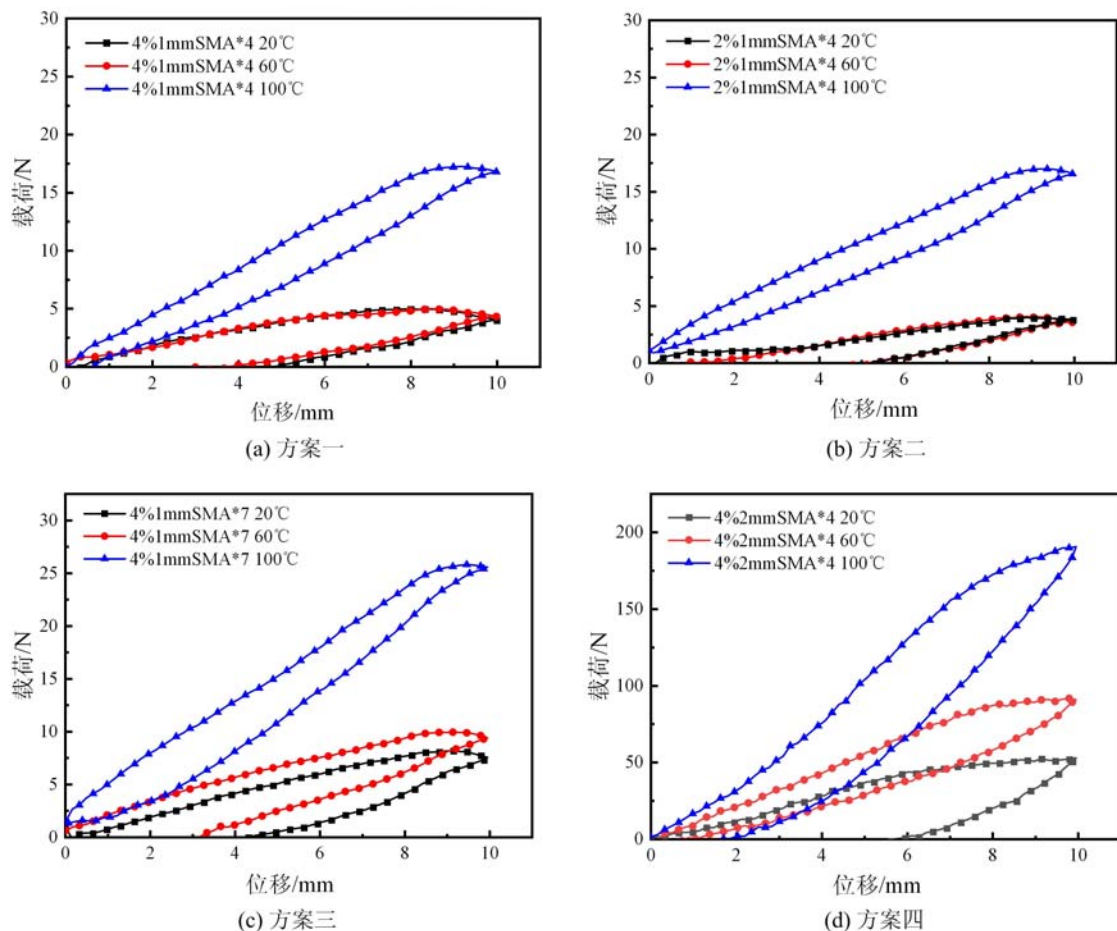


图6 不同温度下SMA/橡胶复合材料板的弯曲-回复响应曲线

Fig. 6 Bending-recovery displacement of SMA/rubber composites at different temperatures

不难发现,直径 2mm 的丝在抗弯能力方面比直径 1mm 的丝有量级上的提升,而随着温度升高,该试样无论是抗弯能力还是卸载后的回复能力均呈现明显的改善趋势:100℃ 工况下的位移-载荷曲线、回复位移量高于 60℃ 工况,60℃ 工况下的位移-载荷曲线、回复位移量高于 20℃ 工况。

图 7 为同一温度下、不同结构形式的复合板弯曲-回复过程位移-载荷曲线。图 7(a)为 20℃ 工况下的复合板实验结果,由图可以看出:当丝的直径同为 1mm、数量同为 4 时,方案一的弯曲-回复性能优于方案二,但区别不明显;当丝的体积分数占比同为 4% 时,方案三的弯曲-回复性能明显优于方案一和方案二;当丝的直径不同时,无论从数量上还是体积分数上对比,2mm 丝的 NiTi/硅橡胶复合板抗弯刚度远高于 1mm 丝的复合板,但回复性能不如 1mm 丝的复合板。图 7(b)为 60℃ 工况下的复合板实验结果,该图给出的绝大部分结果规律与图 6(a)类似,但该工况下 2mm 丝的 NiTi/硅橡胶复合板的回复性能也优于 1mm 丝的复合板,这一点与 20℃ 的情形有所区别。图 7(c)为 100℃ 工况下的复合板实验结果,由该图可以看出:当丝的直径同为 1mm、数量同为 4 时,方案一和方案二的弯曲-回复性能相当;当丝的体积分数占比同为 4% 时,方案三的抗弯刚度明显高于方案一和方案二,但回复性能三者相同;当丝的直径不同时,无论从数量上还是体积分数上对比,2mm 丝的 NiTi/硅橡胶复合板抗弯刚度同样远高于 1mm 丝的复合板,且在回复性能上基本相同。

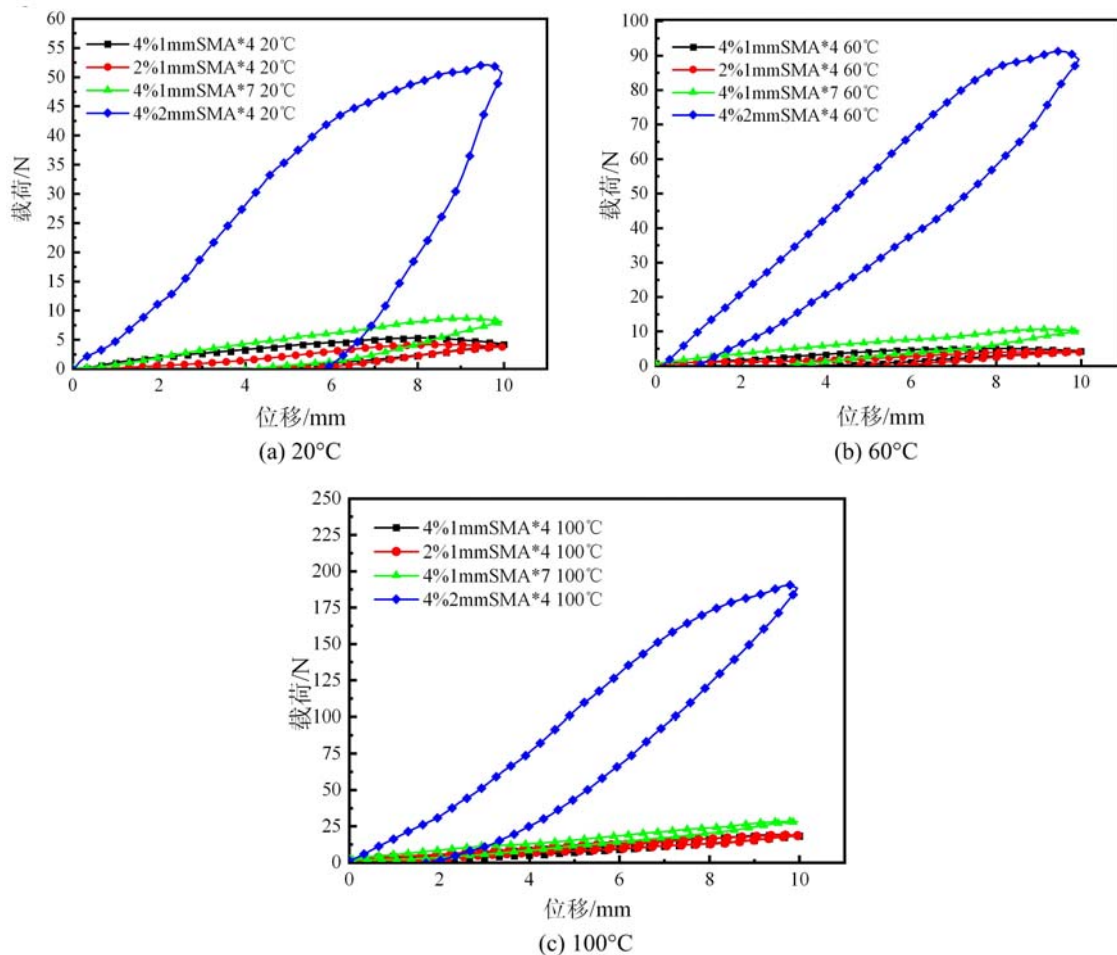


图 7 不同结构形式的 SMA/橡胶复合材料板弯曲-回复响应曲线

Fig. 7 Bending-recovery displacement of SMA/rubber composites with different wire arrangements

对于以上实验现象,以选用 1mm 合金丝的复合体系(方案一、方案二和方案三)为例,从机理上分析,主要是在 20℃ 工况的温度低于 A_s , SMA 的弹性模量较小,复合材料板对弯曲变形的抵抗能力较弱,所以在向下弯曲 10mm 时不同结构产生的最大弯曲载荷均较小(6N 左右),在卸载阶段主要是橡

胶基体变形储存的部分应变能释放与 SMA 丝超弹性的共同作用带动位移的回复。当温度介于 A_s 与 A_f 之间的 60°C 时, 尽管 SMA 的弹性模量相比 20°C 时有所增加, 但橡胶基体会随温度的升高而变软, 所以复合材料板整体的抵抗变形能力并未显著提升, 在卸载阶段, 由于橡胶基体变软会储存更多应变能, 这种超弹性与 SMA 丝形状记忆效应的综合作用使得回复性能有所改善, 尤其在丝的数量较多、体积分数占比较大的情况下更加明显。当温度达到高于 A_f 的 100°C 时, 虽然橡胶基体持续变软, 但是 SMA 的弹性模量显著增强, 所以复合材料板整体的抵抗变形能力出现了跃升, 在向下弯曲 10mm 时产生的最大弯曲载荷达到 $18\sim 26\text{N}$, 在卸载阶段, 尽管仍有橡胶基体应变能释放的贡献, 但从曲线回复斜率来看, 高温下 SMA 的形状记忆效应是带动位移回复的主要因素。

综合图 6 与图 7, 对比不同温度下 2mm 丝与 1mm 丝的复合材料板实验结果还可发现, 回复性能的差异主要是因为直径越大的 SMA 等效阻尼比越小, 其弯曲回复所需的能耗也就越大^[18,19], 从而造成 20°C 工况下方案四的回复位移相对较小。然而随着温度的升高, 尤其是材料内部发生奥氏体相变后, 由于 SMA 形状记忆效应的充分发挥, 这使得方案四无论抗弯能力抑或回复性能都优于其他 3 种方案。总体而言, 在达到奥氏体相变温度后, 4 种结构设计的复合板位移基本都能完全回复, 这应该说是比较理想的。

3.2 合金丝温升及复合板驱动特性的评估分析

3.1 节对 4 种方案的复合板试样弯曲-回复实验结果进行了分析比较, 发现在高温状态下 2 种直径、不同结构的 NiTi 丝/硅橡胶体系均表现出良好的驱动-回复响应。为了让复合板的设计更加贴近实际应用, 还要寻求一种相对简单易行、响应速度快的驱动方式。为此我们对 2 种不同直径 (1mm 和 2mm) 的 SMA 丝温升特性进行计算分析。参考邹娇等^[20]对记忆合金电阻特性的研究结果, 本文得到 SMA 丝通电时间 t 后获得的能量表达式为

$$I^2 R \Delta t = C \rho V \Delta T + h S (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

对式(1)积分可得到通电加热过程中 SMA 丝的温度 T 随时间 t 变化的函数关系:

$$T = T_0 + \frac{4 I^2 \rho_r}{h \pi^2 d^3} (1 - e^{-\frac{4 h t}{\rho_r C d^3}}) \quad (2)$$

式(1)、式(2)中: S 为基体与合金丝接触的壁面面积; I 为电流; R 为电阻; C 为比热容; ρ 为密度; V 为体积; ΔT 为 SMA 丝的温升; h 为 SMA 丝热对流系数; $(T - T_0)$ 为通电 t 后的温度差; ρ_r 为 SMA 丝的电阻率。本文中这些参数的取值见表 1。

表 1 NiTi SMA 丝基本参数
Tab. 1 Basic parameters of NiTi-SMA wire

参数	单位	数值
密度 ρ	kg/m^3	6500
对流传热系数 h	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	30
比热容 C	$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	460
电阻率 ρ_r	$\mu\Omega \cdot \text{m}$	50

设初始温度为 20°C , 利用式(2)计算出通电加热过程中不同时刻对应的温度值, 进而得到 2 种直径的 SMA 丝在一系列电流强度下通电时间与加热温度的关系曲线, 如图 8 所示。由图 8 可以看出, 不同直径的 SMA 丝通电加热的效率有很大差别。一般来说, 电流强度越高, SMA 从常温到达奥氏体相变温度的时间越短, 但由于材料在加热过程中会与周边环境发生热交换(这是不可避免的), 所以在每个电流值下都会存在一个热平衡点, 达到热平衡点后即使继续通电, 合金丝的温度也不会再改变, 因此当电流较低时材料有可能无法达到相变温度。具体到 1mm 的 NiTi 合金丝, $4\sim 5\text{A}$ 强度的电流可使其在很短的时间内(约 5s)升温至相变温度, 但同样的输入只能使 2mm 的 NiTi 合金丝升温至 30°C , 无法驱动

其回复响应。对于 2mm 的 NiTi 丝,只有在电流强度 10A、通电 20s 的情况下才能超过材料相变温度。由此可见,合金丝的直径对复合板驱动-回复性能的影响趋势并不是单一的,它体现为能量输入和驱动效果的一对矛盾。在满足承载能力和回复响应要求的前提下,直径越小的合金丝通电加热效率越高,考虑到橡胶基体对热量有吸收,SMA 的体积分数占比越多越好。综合 3.1 节和 3.2 节的结论,我们最终确定将方案一应用于接下来的实际模型制作与验证。

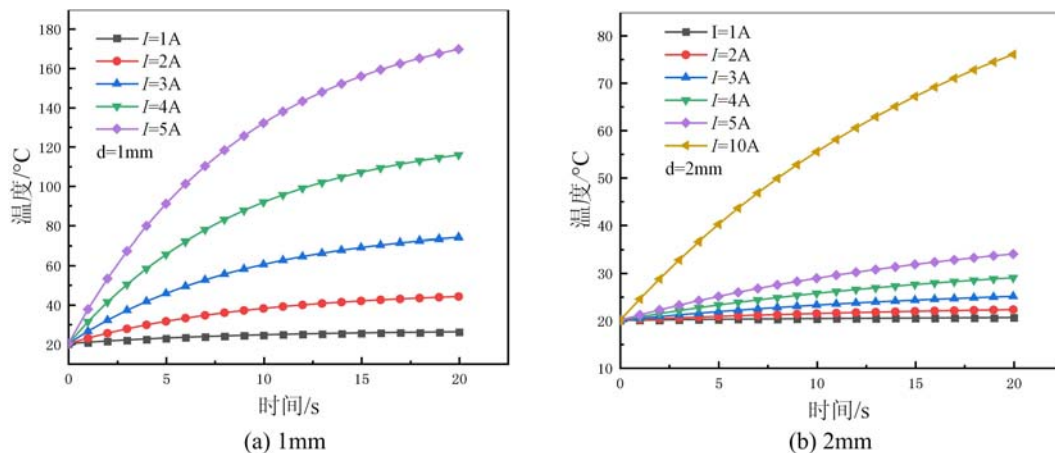


图 8 不同直径 NiTi 丝通电时间与加热温度的关系曲线

Fig. 8 Relationship between temperature and heating time for different NiTi wires

4 NiTi/硅橡胶复合板的应用场景

本文第 3 节基于弯曲-回复实验研究了 SMA/橡胶复合材料的驱动与回复响应,这种柔性智能材料能够承受较大的变形,加之硅橡胶良好的绝缘隔热、抗老化耐腐蚀与生物相容性,特别适合在仿生或军事领域进行器件开发。例如对水下无人侦察机(UUV 等)而言,这类装备的隐蔽性强、成本低、制造速度快,然而由于翼展长度相对较大,在非战斗状态下将会占据较大的空间,目前亟需寻求一种高效控制模式,将机翼设计为折叠形状,且在足够短的响应时间内能够被较方便地驱动展开。SMA/橡胶复合体作为翼板,其折叠变形可经过通电加热回复,在通电状态下材料处于完全奥氏体相,整个体系具有较好的抗弯刚度,理论上可以满足构件的承载要求。因此根据第 3 节中弯曲-回复实验与讨论结果,同时考虑 SMA 丝的电特性,我们立足于方案一的结构形式,完善了电驱动 SMA/橡胶复合材料的可折叠翼设计与制作方案,以便为这类主动控制的器件开发与应用积累具体案例,并提供一些方法上的支持。

使用 3 种规格的铅酸蓄电池(参数见表 2),针对方案一给定的 NiTi/硅橡胶复合板,测试其通电加热效率,发现 12V 的额定电压能够满足能量输入的要求,整个由 SMA 丝形成的闭环线路在 4~5s 内温度可达到 90℃ 以上。在此基础上,接着考虑了匹配的壳体形状与尺寸,将折叠翼与 3D 打印成型的壳体搭接固定后,辅以适当的线路布置,组装成一个如图 9 所示的 UUV 模型。由图 9 可以看出,模型两侧连接 NiTi/硅橡胶复合翼板,其中并排的 NiTi 丝作为驱动部件,周围的橡胶载体确保了其良好的可折叠弯曲特性。使用无线开关远程控制,通电加热后两侧翼板随即同步展开。为测试该系统的折叠/展开效果,我们记录了相应的展开过程,从折叠状态到完全展开状态的响应时间为 10~12s,应该说效果好,且这些过程中 NiTi 丝均能与橡胶基体保持良好的黏结状况^[21]。总的来说,尽管目前这种复合板结构设计及驱动机制的探索还是初步的,但它们无疑为后续的应用研究提供了可借鉴的思路,随着实验条件和设备更新,有望实现更丰富、完备的 SMA/橡胶复合结构力学设计与驱动研究。

表 2 铅蓄电池的规格参数及选择

Tab. 2 Specification parameters and selection of lead battery

尺寸规格/mm	额定电压/V	电池容量/(A·h)	能否驱动	方案选择
100×90×70	12	5	是	
100×69×45	6	5	否	
96×70×45	12	2.6	是	是

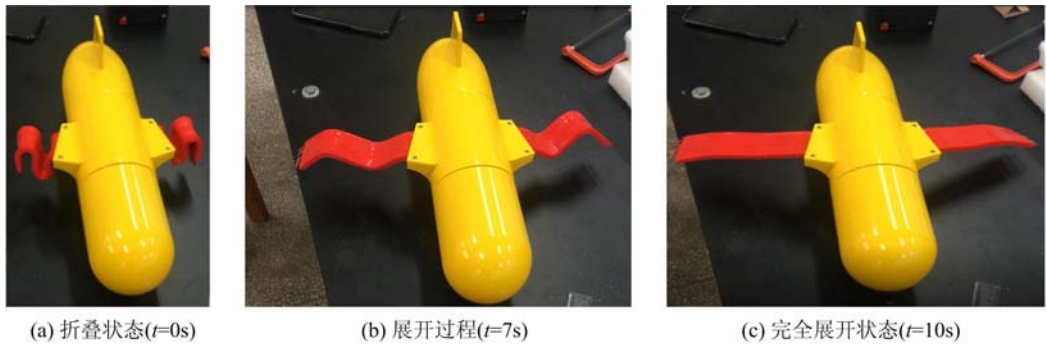


图 9 UUV 壳体模型连接复合板的折叠翼驱动展开过程

Fig. 9 Actuation and expansion process for the UUV model connected with foldable composite plate

5 结论

通过开展一系列 SMA/橡胶复合材料板的弯曲-回复实验,对比不同温度条件、不同结构形式的载荷-位移曲线,探讨了丝的直径、体积分数等因素的影响规律,从而初步揭示了基于形状记忆合金的超弹性复合板在温度作用下的驱动-回复机制与响应特征。结合实验结果与计算分析,在现有水平下提出了一种通电加热式驱动、响应时间短的可折叠/展开翼板(使用 1mm 直径 NiTi 丝与硅橡胶复合而成),获得了有助于该领域进一步研究的相关结论:由于温度对 2 种组分性能的影响,SMA/橡胶复合材料板的抗弯刚度随着温度升高而不断增强,驱动-回复能力也随之增强;同时 SMA 丝的数量、直径以及体积分数占比都对体系的驱动-回复能力有着正相关的影响,三者中任一因素强化,都会导致其随温度升高增强的效应更加显著。此外,由于这类复合体系的载体材料是软橡胶,室温情况下,SMA 材料并未体现出形状记忆效应,橡胶在经历弯曲时储存的应变能将于卸载阶段释放出来,从而与 SMA 的超弹性共同带动复合板的变形回复,这一点与其他树脂基或金属基的智能材料有所不同。

当然,本文的实验研究及相关设计暂时关注的只是 NiTi 丝单程驱动与回复,对于实际情况中具有更多需求的双程驱动控制,将在后续工作中结合实测与仿真手段,尝试对丝材进行预拉伸或弯曲成圆弧状,再偏心放置于橡胶基体中,以便同时发挥 SMA 的形状记忆效应和橡胶弹性应变能的储存与释放机制,从而实现双程大变形和回复。

参考文献:

[1] Xu J, Miao X B, Yang S, et al. Stochastic resonance of giant magnetostrictive film-shape memory alloy composite cantilever plate[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2017, 30(5):1371—1375.

[2] Lester B T, Baxeavanis T, Chemisky Y, et al. Review and perspectives: shape memory alloy composite systems [J]. Acta Mechanica, 2015, 226(12):3907—3960.

[3] 王雯霏, 张建设, 林新志. 聚合物基形状记忆合金复合材料研究进展[J]. 材料开发与应用, 2015, 30(2):87—93 (WANG Wenfei, ZHANG Jianshe, LIN Xinshi. Development of the SMA reinforced polymer matrix composite system[J]. Development and Application of Materials, 2015, 30(2):87—93 (in Chinese))

- [4] 熊克, 陶宝祺, 金江. 形状记忆合金增强复合材料连接件模型的实验研究[J]. 实验力学, 2000, 15(2):253—256 (XIONG Ke, TAO Baoqi, JIN Jiang. The experimental research for a shape memory alloy reinforced composite joint model[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(2):253—256 (in Chinese))
- [5] Jani J M, Leary M, Subic A, et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities[J]. Materials and Design, 2014, 56(4):1078—1113.
- [6] Zhang R X, Ni Q Q, Natsuki T, et al. Mechanical properties of composites filled with SMA particles and short fibers[J]. Composite Structures, 2007, 79(1):90—96.
- [7] Taheri-Behrooz F, Taheri F, Hosseinzadeh R. Characterization of a shape memory alloy hybrid composite plate subject to static loading[J]. Materials & Design, 2011, 32(5):2923—2933.
- [8] Nuecking K, Abu-Zarifa A, Youcheu-Kemtchou S, et al. Polymer/NiTi-composites: fundamental aspects, processing and properties[J]. Advanced Engineering Materials, 2005, 7(11):1014—1023.
- [9] Sadrnezhaad S, Nemati N, Bagheri R. Improved adhesion of NiTi wire to silicone matrix for smart composite medical applications[J]. Materials and Design, 2009, 30(9):3667—3672.
- [10] Tissot F, Rey T, Heller L, et al. Experiments and modeling of smart silicone elastomer membranes reinforced with shape NiTi textiles[C]. The 8th EUROMECH—Solid Mechanics Conference (Austria), 2012.
- [11] Natali A N, Carniel E L, Gregersen H. Biomechanical behaviour of oesophageal tissues: material and structural configuration, experimental data and constitutive analysis[J]. Medical Engineering and Physics, 2009, 31:1056—1062.
- [12] Rey T, Cam J B L, Chagnon G, et al. An original architected NiTi silicone rubber structure for biomedical applications[J]. Materials Science and Engineering C, 2014, 45:184—190.
- [13] 杨媛, 徐志伟. 基于 SMA 的飞行器变体机翼驱动结构研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(1):25—30 (YANG Yuan, XU Zhiwei. Study on the wing drive structure of aircraft variant based on SMA[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(1):25—30 (in Chinese))
- [14] Feng N, Liu L, Liu Y, et al. Characteristics of multi-functional composites using elastomer embedded with shape memory alloy wires[J]. Materials and Design, 2015, 88(18):75—81.
- [15] Stirling L, Yu C H, Miller J, et al. Applicability of shape memory alloy wire for an active, soft orthotic[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(4):658—662.
- [16] Li Z, Huang R, Liu Z. A periodic deformation mechanism of a soft actuator for crawling and grasping[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4:1900653.
- [17] ASTM International. Standard test method for transformation temperature of nickel-titanium alloys by thermal analysis; ASTM F2004—17[S]. USA: Annual Book of ASTM Standards, 2017.
- [18] 刘丹瑛, 丁希凡, 陈宏, 等. 不同直径 NiTi 形状记忆合金丝的相变和超弹性特性[J]. 上海金属, 2020, 42(3):17—20 (LIU Danying, DING Xifan, CHEN Hong, et al. Phase transition and hyperelastic properties of NiTi shape memory alloy wires with different diameters[J]. Shanghai Metals, 2020, 42(3):17—20 (in Chinese))
- [19] 张明明, 王社良, 张世民, 等. NiTi 形状记忆合金丝力学性能试验研究[J]. 力学季刊, 2016, 37(4):729—735 (ZHANG Mingming, WANG Sheliang, ZHANG Shimin, et al. Experimental study on mechanical properties of NiTi shape memory alloy wire [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2016, 37(4):729—735 (in Chinese))
- [20] 邹娇, 张忠强, 丁建宁, 等. 软体机器人驱动研究现状[J]. 机器人, 2018, 40(5):648—659 (ZOU Jiao, ZHANG Zhongqiang, DING Jianning, et al. Research status of soft robot drive[J]. The Robot, 2018, 40(5):648—659 (in Chinese))
- [21] 邹阳, 李旭, 朱四荣. 温度影响下形状记忆合金/橡胶复合材料界面力学性能[J]. 实验力学, 2020, 35(5):859—866 (ZOU Yang, LI Xu, ZHU Sirong. The mechanical interface properties of shape memory alloy/rubber composite under temperature effect[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(5):859—866 (in Chinese))

Study on the driving mechanism and recovery response of hyper-elastic SMA/rubber composite plates

LIU Xu, ZHU Zenghui, LI Xu, LIU Jili

(Hubei Key Laboratory of Theory and Application of Advanced Materials Mechanics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: In order to study the driving mechanism and recovery response of soft composites made of shape memory alloy and rubber elastomer, a series of bending-recovery experiments for NiTi wire/silicone composite plates were carried out. By comparing the load-unloading force-displacement curves of composite plates with different wire arrangements at different temperatures, we analyzed the factors related to diameter, structural configuration and volume ratio of NiTi wires affecting upon the driving-recovery property of this kind of hyper-elastic smart system, and then discussed the influence of temperature. Based on the experimental results, a foldable wing panel made of SMA and rubber elastomer, which can be easily actuated by electric heating within short time, is proposed at the current level. Test results show that the phase transformation induced by temperature variation can significantly improve the bending-recovery performance of NiTi/silicone composite plates, and their driving-recovery ability can exhibit obvious improvement accompanying with the increase of diameter, amounts and volume ration of the SMA component under a certain degree of temperature. In addition, the storage and release of the strain energy from rubber matrix plays an important role to realize the deformation recovery of entire system, during its bending and unbending process. This phenomenon is especially distinct under the case of room temperature, when the SMA does not show any shape memory effect.

Keywords: SMA; rubber elastomer; bending-recovery experiment; temperature effect; driving mechanism