

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.03.010

PVDF 基薄膜复合 SMA 片式弯曲驱动器

钱国明^{1,2,3}, 朱孔军¹, 吉爱红¹, 刘超³, 杨立侗³, 黄卫清^{1,4}

(1. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016; 2. 江苏航运职业技术学院交通工程学院, 南通 226010; 3. 海安上海交通大学智能装备研究院, 南通 226600; 4. 广州大学机电工程学院, 广州 510006)

摘要: 形状记忆合金 (Shape memory alloy, SMA) 作为智能驱动材料之一, 因具有变形量大、变形方向自由度大且变形可短时急剧发生等特点得以广泛开发应用。目前关于 SMA 的应用主要围绕其形状记忆特性与伪弹性特性, 且皆与温度直接相关, 但较低的响应频率限制了其适用范围。基于此, 本文在聚偏氟乙烯 (Polyvinylidene fluoride, PVDF) 中引入锆酸铅钡 ($\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{ZrO}_3$, PBZ) 纳米陶瓷纤维, 采用溶液流延法将其涂覆于 NiTi 片表面制备 PBZ/PVDF@SMA 片式复合弯曲驱动器, 室温下通过 PBZ/PVDF 薄膜的电卡效应加热及冷却 SMA 片式弯曲驱动器, 并与传统电流加热与自然冷却 SMA 方式作对比, 旨在缩短 SMA 片式弯曲驱动器循环周期, 同时获得较高的位移输出, 通过仿真模拟揭示 PBZ/PVDF 复合薄膜加热与冷却 SMA 片式弯曲驱动器过程。

关键词: 形状记忆合金; 薄膜; 复合弯曲驱动器; 循环周期; 位移输出

中图分类号: V214.8; TH113.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)03-0487-09

PVDF-Based Thin Film Composite SMA Sheet Bending Actuator

QIAN Guoming^{1,2,3}, ZHU Kongjun¹, JI Aihong¹, LIU Chao³, YANG Liyong³, HUANG Weiqing^{1,4}

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. School of Transportation Engineering, Jiangsu Shipping College, Nantong 226010, China; 3. Hai'an Institute of Intelligent Equipment, Shanghai Jiao Tong University, Nantong 226600, China; 4. School of Mechanical and Electric Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: As one of the smart actuator materials, shape memory alloy (SMA) has been widely developed and used with the characteristics of large deformation, large freedom of deformation direction, and the fact that the deformation can occur dramatically in a short period of time. The current application of SMA mainly focuses on its shape memory properties and pseudo-elastic properties, and both are directly related to temperature, but the low response frequency limits its application range. Based on this, lead barium zirconate ($\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{ZrO}_3$, PBZ) nanoceramic fibres are introduced into polyvinylidene fluoride (PVDF), which are coated on the surface of NiTi sheet to prepare PBZ/PVDF@SMA sheet composite bending actuators by solution casting method. At room temperature, heating and cooling of SMA sheet bending actuators by the electrocaloric effect of PBZ/PVDF films, and comparing it with conventional methods of current heating and natural cooling SMA, aims to shorten the cycle time of the SMA sheet actuator and obtain a higher displacement output at the same time. The process of heating and cooling SMA sheet bending actuator with

基金项目: 国家自然科学基金 (51672130, 52075180); 机械结构力学与控制国家重点实验室研究基金 (MCMS-0518K01); 江苏省重点研发计划 (BE2018008-2); 江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 研究面上项目 (22JKD430004); 校级科研启动经费 (HYRC202406)。

收稿日期: 2025-01-10; **修订日期:** 2025-05-06

通信作者: 朱孔军, 男, 博士, 教授, E-mail: kjzhu@nuaa.edu.cn; 黄卫清, 男, 博士, 教授, E-mail: mehwq@nuaa.edu.cn。

引用格式: 钱国明, 朱孔军, 吉爱红, 等. PVDF 基薄膜复合 SMA 片式弯曲驱动器 [J]. 南京航空航天大学学报 (自然科学版), 2025, 57(3): 487-495. QIAN Guoming, ZHU Kongjun, JI Aihong, et al. PVDF-based thin film composite SMA sheet bending actuator [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(3): 487-495.

PBZ/PVDF composite film is simulated by simulation software.

Key words: shape memory alloy (SMA); thin film; composite bending actuator; cycle time; displacement output

形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)因其独特的形状记忆效应、超弹性、高阻尼及良好的生物相容性等优势得到广泛关注与青睐。同时 SMA 驱动结构兼具高弹性模量、大驱动位移、优异的阻尼特性等,因而在越来越重视空间、质量、成本等因素的当代研究发展中, SMA 依然具有很高的开发与研究价值^[1-4]。在保证性能的前提下, SMA 优异的形状记忆效应(Shape memory effect, SME)与超弹特性(Super elastic effect, SEE)可根据不同适用场合需求做出形状上的调整与结构上的嵌套^[5-10]。在应用发展过程中,适用性较广的为 SMA 丝,其输出位移($\leq 8\%$)取决于总长度,但在限容与定状的条件下却很难有较大的位移输出,而柔性弯曲 SMA 驱动器可以解决这一问题,同时也在多段叠加的情况下能加大其位移输出,从而丰富了 SMA 的适用场合与结构设计^[1,11]。与此同时, SMA 的应用受限于其较低的响应频率(一般不高于 10 Hz)^[12-14],这主要是因为其激励方式单一且时间较长,加热时间一般在数秒内完成,但冷却时间却长达数十秒,使得响应时间变长,在高频领域较难发挥作用^[15-19]。

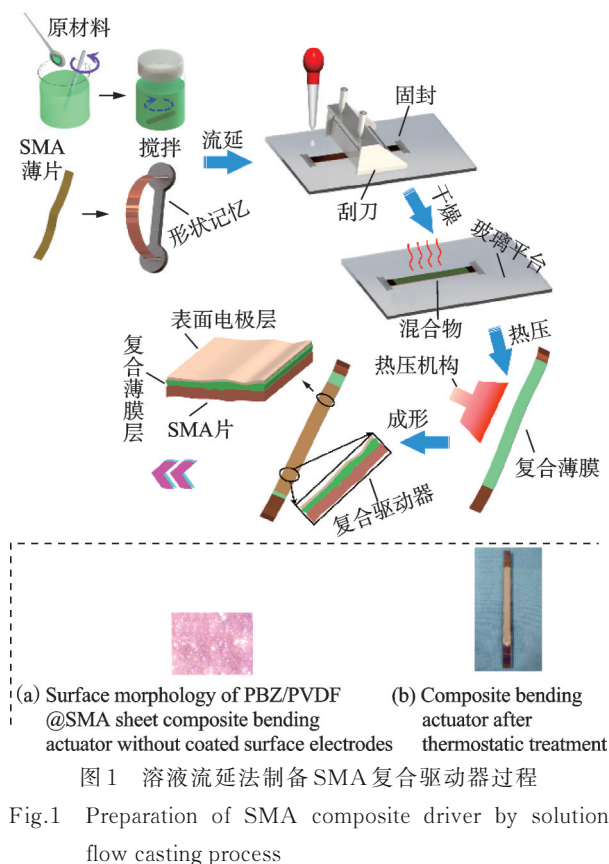
制冷问题一直以来备受关注,当前节能环保的电卡制冷走入研究者视野,在材料选取中大多数聚焦于材料的不同制备方式、元素掺杂调控相变温区及有机无机复合等,均取得了较理想的熵变与温变值^[20-22]。这其中有望实现应用的为无机材料与有机聚合物复合制备成的复合薄膜——具有较大的击穿场强与较高的介电常数,且自身较柔软的特性也便于加工成各种形状,易于实现集成电卡材料制冷^[23-24]。锆酸铅(PbZrO_3 , PZ)陶瓷具有优异的电性能存储及能量转换性能,室温时为反铁电相,但通过 Ba 元素掺杂可以使其在室温附近具有反铁电-铁电相变,相变温度附近存在大的形变及熵变^[25]。同时,聚偏氟乙烯(Polyvinylidene fluoride, PVDF)及其共聚物因其优异的铁电性能成为聚合物基体的最佳选择。

综上所述,本文在 PVDF 基体中引入锆酸铅钡($\text{Pb}_{0.8}\text{Ba}_{0.2}\text{ZrO}_3$, PBZ)纳米纤维^[26],采用溶液流延法将其涂覆于 SMA 片表面,制备成 PBZ/PVDF@SMA 片式复合弯曲驱动器。在室温下研究复合驱动器输出位移与循环周期特性,并与传统电流加热与自然冷却 SMA 片式弯曲驱动器作对比,得出复合弯曲驱动器的性能特点,最后通过仿

真软件模拟薄膜加热与冷却 SMA 过程,依此阐述 PBZ/PVDF 薄膜加热及冷却 SMA 材料机制。

1 实验方法

实验所用 SMA 片长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=100\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$, Ni 的原子百分量为 55.45%,通过差示扫描量热仪测得其相变温度为: $M_s=23\text{ }^\circ\text{C}$, $M_s=56\text{ }^\circ\text{C}$, $A_s=30\text{ }^\circ\text{C}$, $A_f=63\text{ }^\circ\text{C}$,采用溶液流延法在 SMA 单侧外表面涂覆复合薄膜,其制备过程如图 1 所示。在室温下称取所需量的 PBZ 纳米纤维均匀分散于 N,N-二甲氧基甲酰胺(Dimethylformamide, DMF)中,超声处理 1 h 以降低团聚现象,称取定量的 PVDF 粉体加入悬浮溶液中,室温下磁力搅拌 20 h 得到均匀的混合溶液静置备用。通过模具将 SMA 片形状固定,在一定的条件下进行时效训练,室温下将其展平,两端用胶带封固,刮刀预设一定高度,通过溶液流延在 SMA 片单侧涂覆混合溶液,将其置于恒温箱中保存 20 h,温度设定为 $80\text{ }^\circ\text{C}$,将其夹于模具间再置于热压机中恒温处理 1 h,热压过后取出样品,并在 PBZ/PVDF 复合薄膜表面涂覆导电银浆,恒定温度保存一定时间后取出并接外连导线。导电银浆所在的一极为正极,



SMA片为负极端,并在SMA片端部粘贴挂钩以悬挂载荷,即得到制备完成的PBZ/PVDF@SMA片复合弯曲驱动器。

2 测试结果与讨论

2.1 SMA片式弯曲驱动器性能测试

为了验证复合薄膜的加热与冷却作用,需得到传统电流加热与自然冷却时所对应的SMA片式弯曲驱动器性能,其端部位移测试系统的搭建如图2(a)所示,将激光位移传感器与电脑端连接进行实时位移检测,通过电流加热使SMA片式弯曲驱动器逆相变弯曲,在端部悬挂载荷以自然冷却方式使其回复到平衡位置。图2(b)为SMA片式驱动器位移测试放大部位,端部所施加载荷质量为2.67 g。图2(c,d)是电流分别为2.0 A与4.0 A时,SMA片式弯曲驱动器在弯曲程度达到最大时所对应的实验图,从图中可以很明显地区别其对应的施加电流,且端部弯曲变化很明显,在较大的电流下,端部弯曲程度更大,因而在垂直方向上对应的距离变化也最大,此时输出的距离也最大。图2(e)为端部位移重复性测试,当未施加电流($I=0.00$ A)时,可观测到其端部位移在整个时间内未发生变化,当给予不同电流时($I=0.05, 2.0$ 和 4.0 A),在重复测试中其位移变化情况基本一致,说明位移重复性较好,测试结果可以作为评断其性能优劣的依据。在不同电流下,SMA端部位移随时间变化关系如图2(f)插图所示,可知当在SMA片式弯曲驱动器两端给予电流时,由于受热发生逆相变,SMA片端部弯曲产生距离差,从图中可见,随着施加电流的增大,其端部距离差逐渐增大,当电流为4.0与4.5 A时,所产生的距离值基本一致,因此电流下基本达到弯曲变形最大程度;在冷却时,由于端部悬挂载荷,因而端部并未恢复至初始位置,而新的平衡位置处静止。图2(f)为不同施加电流下,SMA片式弯曲驱动器端部输出距离变化情况,当电流为0.5 A时,其端部距离变化约为3.11 mm;当电流为2.0 A时,输出距离约为25.85 mm;而当电流增大至4.0 A时,端部输出距离增大至46.03 mm,继续增大电流时其输出距离变化较小。图2(g)为根据其位置变化得到的在不同电流下所对应的加热时间与冷却时间,在所施加的电流 $0.5 \text{ A} \leq I \leq 4.5 \text{ A}$ 范围内,所对应的加热时间基本相同,约在40 s达到输出距离最大位置处,但其自然冷却时间随施加电流的增大而延长且呈线性关系,0.5 A时其冷却时间为86.85 s,2.0 A时为125.89 s,此后冷却时间基本都在120 s左右,由

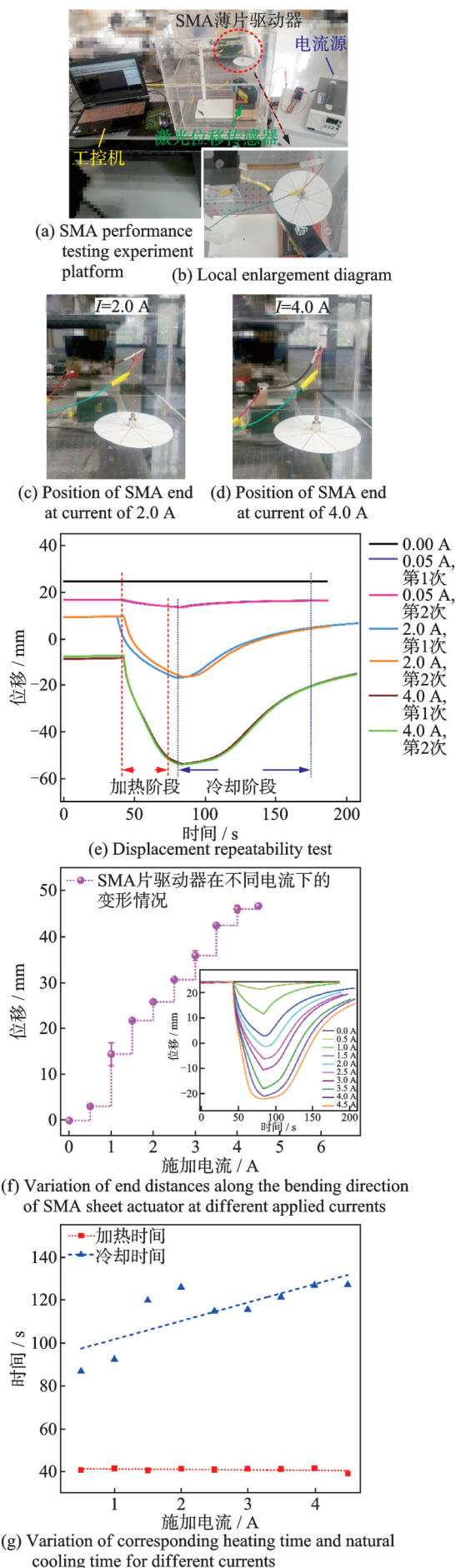


图2 电流加热与自然冷却SMA测试

Fig.2 Testing of current heating and natural cooling SMA

此可知冷却时间是加热时间的 3 倍多,这也是现阶段 SMA 材料响应周期较长的原因,冷却时间的长短影响其响应周期的长短,在一定程度上缩短冷却周期才能在有效时间内提高其往复作动频率。

2.2 PBZ/PVDF@SMA 复合弯曲驱动器性能测试

在纯 PVDF 基体中引入纳米纤维会增加内部缺陷,因而为了提高其施加电压以获得较大的性能,对复合驱动器(图 3(a))进行热压处理(图 3(b))。PBZ/PVDF 薄膜表面未涂覆导电银浆的复合驱动器表面形貌如图 3(c)所示,可以看出棕色背底为 SMA 片所呈现颜色,PBZ/PVDF 复合薄膜呈乳白色,同时表面存在较多分布的白色斑点,此即 PBZ 纳米纤维引入后带来的变化,纳米纤维可以提高 PVDF 基体结晶度,减小晶粒尺寸,从而提高其电卡性能^[26],热压过程可以减少复合薄膜内部缺陷,促进相转变,使其可以承受更高的电场,因而获得较大的电卡性能^[27]。图 3(d)为复合驱动器表面形貌放大图,PBZ/PVDF 薄膜较均匀地附着在 SMA 片外表面,未出现明显的附着不完全及孔洞缺陷,制备完成并用于实验测试所用的 PBZ/PVDF@SMA 片式复合弯曲驱动器如图 4 所示。

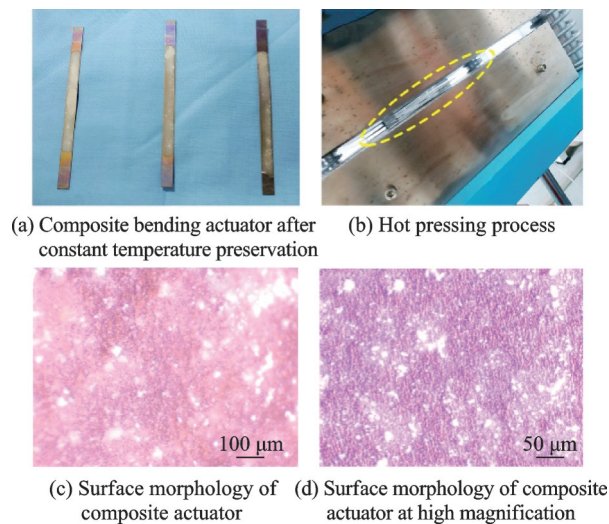


图 3 PBZ/PVDF@SMA 片式复合弯曲驱动器

Fig.3 PBZ/PVDF@SMA sheet composite bending actuator

实验测试过程时,需将 PBZ/PVDF@SMA 片式复合弯曲驱动器固定于绝缘支架上,整个实验过程需要做绝缘防护。图 5(a)为不同电压下位移重复性测试,可以看出当施加电压为 0.00 kV 时,在整个测试时间内端部相对高度未出现明显波动现象,此测试结果作为参照组,当施加电压分别为 0.43 与 0.72 kV 时,在各自的两轮循环中,输出相对高度差/距离差变化过程相似,施加高压后,薄膜发热,SMA 受热产生向上弯曲变形,测试端部相对于

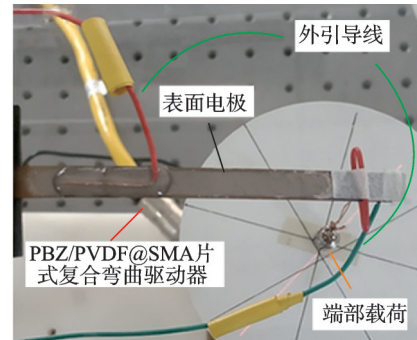
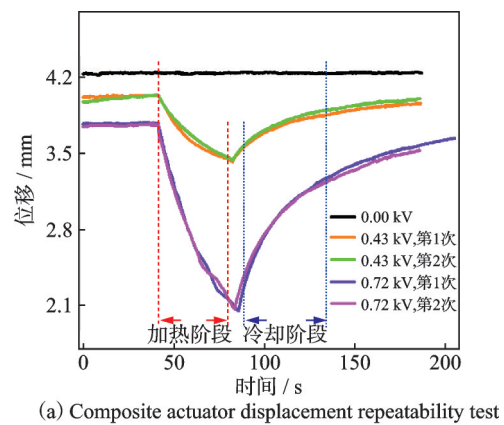


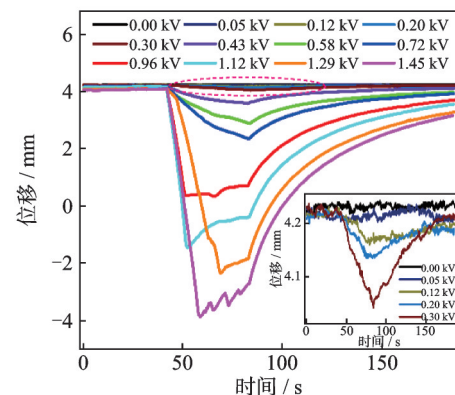
图 4 制备完成的 PBZ/PVDF@SMA 片复合弯曲驱动器

Fig.4 Prepared PBZ/PVDF@SMA sheet composite bending actuator

激光位移传感器高度差变大,在施加电压的过程中越来越多的热量传递给 SMA 片,因而端部向上弯曲幅度增大,相对高度也逐渐变大达到峰值。当撤除电场后,薄膜冷却,SMA 部分热量经由 PBZ/PVDF 薄膜吸收带走,剩下的热量经自然散热方式冷却。图 5(b)为不同电压下,PBZ/PVDF@SMA 片式复合弯曲驱动器端部位移变化情况,虽然施加电压不同,但在施加电压后,复合驱动器端部相对位置改变,根据其相对位置的变化即可判断出与其相对应的加热时间段与冷却时间段,从而得出整个驱动过程的运动周期。



(a) Composite actuator displacement repeatability test



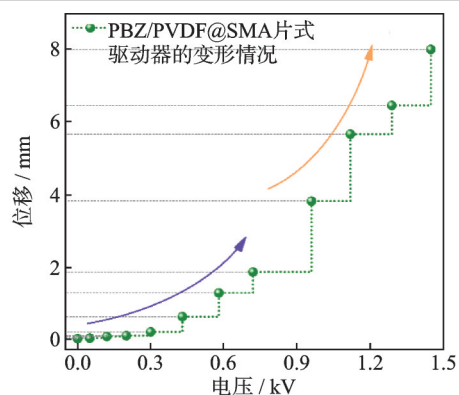
(b) Composite actuator displacement test

图 5 不同施加电压下复合驱动器性能测试

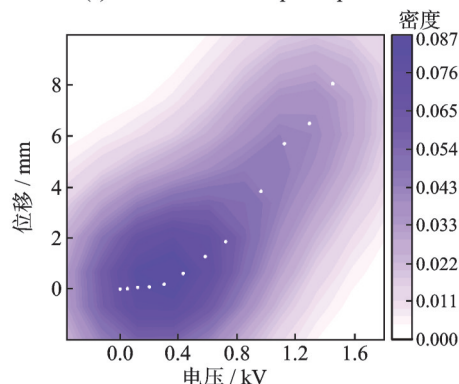
Fig.5 Composite actuator performance testing at different applied voltage tests

依据上述实验得出PBZ/PVDF@SMA片式复合弯曲驱动器输出距离变化情况,图6(a)为不同施加电压下,复合驱动器末端相对于激光位移传感器高度/距离变化,可知随着施加电压的升高,其距离差也随之增大。当施加电压为0.05 kV时,输出距离仅为0.015 mm;当电压增大至0.43 kV时,输出高度差为0.607 mm;当电压增至1.45 kV时,输出距离差增至7.976 mm。实验中获得的最大输出距离为17.25 mm,此时施加电压为2.61 kV,此高度差也是本实验中PVDF基复合驱动器所得到的最大输出距离,较高的施加电压是获得较大距离输出的关键因素。图6(b)为复合驱动器输出距离随施加电压变化而变化的密度关系,当施加电压 $U \leq 0.72$ kV时,输出距离随电压增大而增大的趋势较低,当施加电压 $0.72 \text{ kV} < U \leq 1.45$ kV时,输出距离差增长趋势变大,这与在低场强与高场强下复合薄膜电卡性能不同有关。图6(c)为PBZ/PVDF@SMA片弯曲驱动器加热时间与冷却时间随施加电压的变化情况,加热时间基本在33 s浮动,且随着施加电压的升高有下降趋势,这主要是因为高场强下偶极子翻转速度提高,熵值降低更快,PBZ/PVDF薄膜温度升高更快,因而SMA片式弯曲驱动器加热时间减小且呈下降趋势。冷却时间随着施加电压的升高而升高,而后逐步趋于稳定,数值约在64 s。冷却时间随着施加电压的升高而升高的主要原因为施加电压较高时,薄膜的温度上升更高,当撤除电场后,与薄膜贴合的SMA片表面温度降低,而远离薄膜的SMA片局部热量只能通过自然冷却方式降低。施加电压时,PBZ/PVDF薄膜处于极化状态,偶极子翻转朝向电场方向,当撤除电压后,一部分偶极子仍朝向电场方向,而另一部分偶极子恢复或慢慢恢复翻转前朝向,使得薄膜系统熵值的变化没有施加电场前的大,即表现为以剩余极化值的形式体现,因而制冷的能力受限,同时也因为SMA片体积较大,撤除电压时薄膜只能带走一部分热量,故加热时间与冷却时间不相等,同时随着施加电压的增大,冷却时间逐步趋于平稳,说明在高电压下,薄膜的制冷能力受限,因而冷却时间也逐渐趋于稳定状态。加热时间与冷却时间数值正态分布如图6(d)所示,数值分布较均匀集中,中位数所对应加热时间为33 s,但冷却时间存在异常值,中位数所对应时间为53 s。加热时间小于冷却时间,这与SMA片体积大、散热时由PBZ/PVDF复合薄膜吸收及自然冷却两部分构成有关。

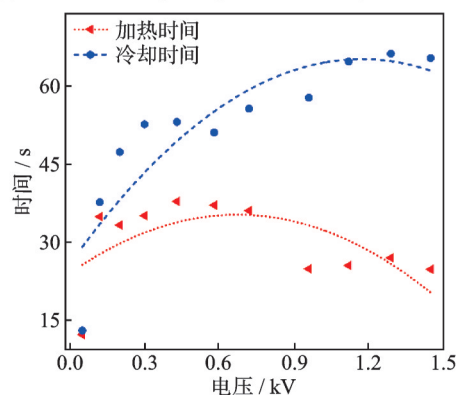
SMA作为驱动材料,能够完成多周期往复循环驱动也是检验其性能优劣的因素之一,图7(a)为不同施加电压下对应的2周期、3周期与4周期



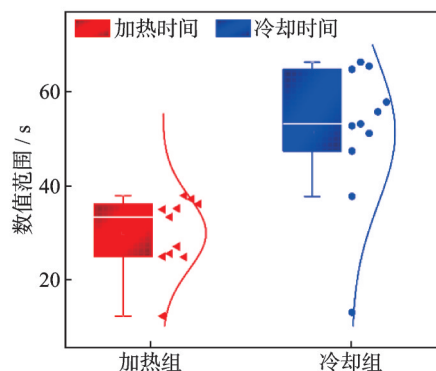
(a) Variation of the output displacement



(b) Variation of output displacement density within test range



(c) Variation of heating time and cooling time



(d) Numerical dispersion of heating time and cooling time

图6 不同高压下PBZ/PVDF@SMA片式复合弯曲驱动器性能分析

Fig.6 Performance analysis of PBZ/PVDF@SMA sheet composite bending actuator at different high voltages

循环往复运动。设定循环周期为40 s,加热与冷却时间分别为20 s。当施加电压为1.20 kV时,其循环高度差约为 $6.11 \text{ mm} < 6.43 \text{ mm}$ (1.29 kV时所对

应的最大距离差)。随着循环的进行,循环高度差明显降低,这与其未彻底完成加热与冷却过程有关。当循环电压为 2.60 kV 时,循环高度差约为 $12.23\text{ mm} < 17.25\text{ mm}$ (2.61 kV 时所对应的最大距离差)。在高压下输出高度差得以提高,但由于未彻底完成加热及冷却,因而每次循环后,端部在新的平衡位置,且逐渐下移,但复合驱动器仍保留较大的循环输出距离差。图 7(b)为复合驱动器所对应的 5 周期与 9 周期循环,当循环周期设定为 20 s 时(9 周期循环往复作动),其加热时间与冷却时间各为 10 s 时,其循环输出距离差约为 6.91 mm,循环周期缩短一半,输出距离差为其 0.565 倍,减少近一半,这皆为缩短周期带来的影响,同时相较于 5 周期循环,平衡位置下降明显,循环周期、输出位移和循环的重复性及高电压等因素为 PBZ/PVDF@SMA 片式弯曲驱动器的一种相互影响、相互牵制又相互平衡的关系,但在一定程度上 PBZ/PVDF 薄膜能够达到缩短 SMA 片弯曲驱动器响应周期、提高响应频率的目的。

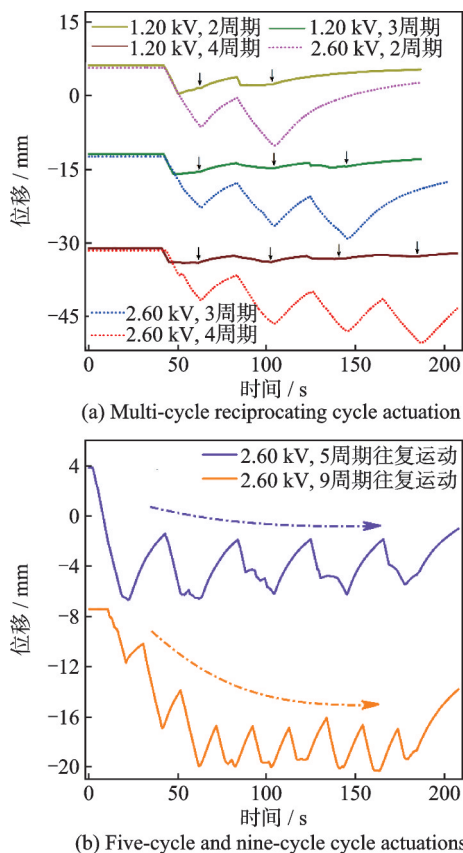


图 7 PBZ/PVDF@SMA 片式复合弯曲驱动器多周期循环作动测试

Fig.7 PBZ/PVDF@SMA sheet composite bending actuator multi-cycle actuation tests

2.3 复合弯曲驱动器仿真模拟

为了研究复合薄膜与 SMA 片之间的热量传

递,通过软件 COMSOL Multiphysics 对其进行仿真模拟, SMA 薄片长 $\times$ 宽 $=6\text{ mm}\times 0.3\text{ mm}$,这与所购材料尺寸相同,导热系数为 $15.24\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;复合薄膜长 $\times$ 宽 $=5\text{ mm}\times 0.35\text{ mm}$,此尺寸约为流延后薄膜尺寸均值。图 8(a)为温度等值面分布,可以清晰地分辨出其温度梯度。施加电场时,薄膜对 SMA 片加热过程主要集中于接触界面处进行,由薄膜向 SMA 片进行热量传递,而 SMA 也是局部受热并非整体。当温度达到 A_s 时, SMA 形变所对应的范围为 $0.2\sim 0.3\text{ mm}$ 区域;横向受热区域为

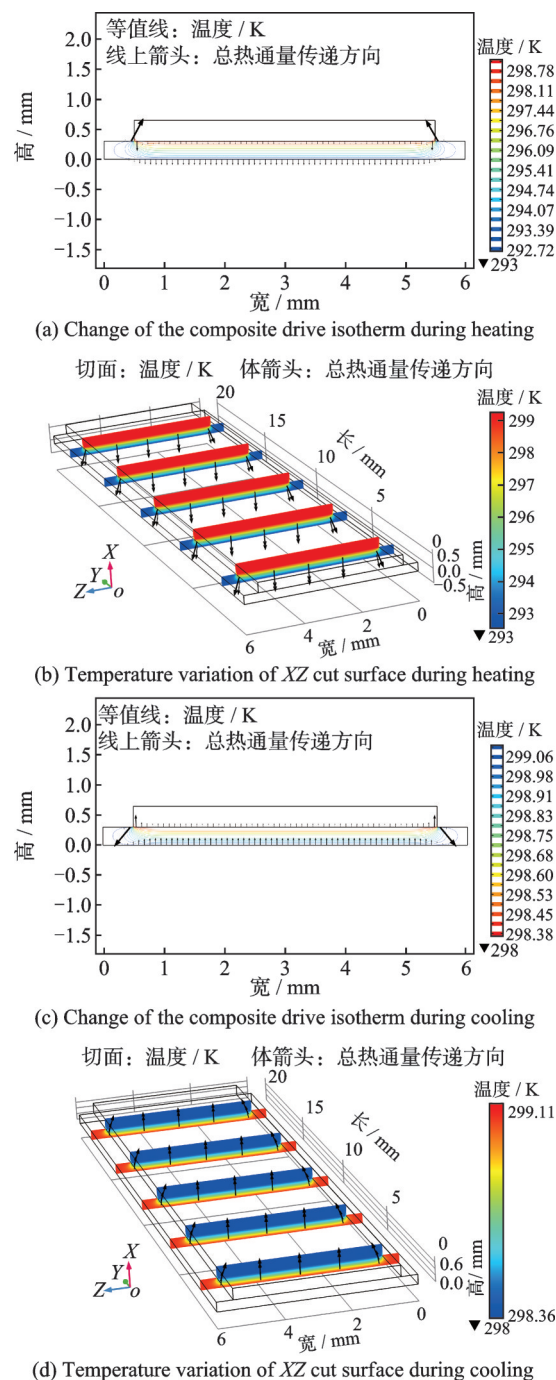


图 8 PBZ/PVDF@SMA 片式复合弯曲驱动器加热与冷却过程仿真

Fig.8 Simulation of heating and cooling processes of PBZ/PVDF@SMA sheet composite bending actuator

0.5~5.5 mm 范围,即薄膜贴合 SMA 片所在区域,薄膜对 SMA 片的加热过程在局部区域进行。通过三维模型的横切面进一步分析其热量传递情况,其中复合薄膜的区域处于红色区域,代表高温区,SMA 片区域处于绿色区域,代表低温区。图 8(b)为切面 XZ 温度变化,箭头所示为热量传递方向,由图可知,以二者接触界面为中心 X 轴负向进行热量传递加热 SMA 片,加热区域为 SMA 片局部区域,薄膜的加热能量在一定的范围内进行。

当撤去电压时,复合薄膜熵值增大,温度降低,此时复合薄膜处于低温状态,对于处于高温状态的 SMA 片起到冷却作用,热量从 SMA 片向复合薄膜传递。图 8(c)为等温线温度分布,靠近薄膜区域温度较低,远离区域温度较高。热量从 SMA 片向复合薄膜传递,如箭头所示。在三维结构中,通过等温面与不同切面温度变化进一步观测其热量传递。图 8(d)为切面 XZ 温度变化,箭头所示为热量传递方向。通过颜色可以清晰地辨别不同区域的温度分布。复合薄膜对 SMA 片的冷却也在局部区域进行,靠近薄膜的 SMA 片区域瞬间达到低温状态,即处于马氏体状态。整个结构在载荷作用下回复初始位置,完成单周期中冷却半周期循环。虽然复合薄膜未达到冷却全部 SMA 片效果,但因热量较小,残余热量通过自然冷却依然得以散失掉。此即 SMA 弯曲驱动器冷却时热量散失情况。

表 1 为不同形式的 SMA 片弯曲驱动器在端部负载时,在不同电流或电压下输出位移及对应的加

热时间、冷却时间、功率和输出力对比,所选择数据为其中 5 组并保留 3 位有效数字。由数据可知复合驱动器输出距离小于未复合驱动器。在 4.0 A 时,未复合 SMA 片式弯曲驱动器输出位移为 46.030 mm;性能最好的 PBZ/PVDF@SMA 弯曲驱动器在 1.45 kV 时输出位移为 7.976 mm,数值相差较大;但循环周期却明显减少很多,因而复合薄膜能够缩短 SMA 片循环周期的作用依然得以体现。究其输出距离受限的因素,则是复合薄膜的体积较小、制冷量低,能量转化效率也有待进一步提高。复合弯曲驱动器降低冷却的时间主要是由 PBZ/PVDF 制冷的效率较高引起的。在复合薄膜极性材料中存在净偶极子,当对其施加外电场时,材料自身极化状态会发生变化,材料的最大极化值会随着施加电场的增加而逐渐增大。偶极子朝着外施加的电场的方向而发生取向,即朝着电场的反向发生翻转,短时快速,使其整个材料有序化程度得以提高,从而使得体系熵值减小,此时材料的温度升高从而出现放热现象。当移除所施加的外电场时,此时系统的熵值又得以增大,材料内部有序化程度降低,偶极子不再朝向电场方向,材料体系在极短的时间内温度降低而出现吸热现象。复合薄膜电卡致冷具有致冷系数大、能量转换效率高和易实现集成化等优点^[19,21,23]。基于此,在输出位移接近的情况下,PBZ/PVDF@SMA 片弯曲驱动器的冷却时间要小于未复合的 SMA 片弯曲驱动器,从而使其响应时间减少,循环周期明显缩短。

表 1 空载与不同电流/电压下,不同形式的 SMA 弹簧驱动器驱动性能部分数据

Table 1 Partial data of performance of different forms of SMA spring driver under no-load and different current/voltage						
形式	电压/电流	输出位移/mm	加热时间/s	冷却时间/s	功率/ 10^{-6} W	输出力/ 10^{-3} N
SMA	0.5 A	3.105	40.919	86.851	1.986	40.852
	1.0 A	14.474	41.554	92.360	9.114	42.162
	2.0 A	25.846	41.390	125.885	16.339	52.874
	3.0 A	35.896	41.329	115.502	22.726	49.646
	4.0 A	46.030	41.636	126.766	28.927	52.916
SMA 复合驱动器	0.12 kV	0.060	34.836	37.620	0.045	27.211
	0.20 kV	0.083	33.219	47.309	0.065	31.715
	0.58 kV	1.263	37.048	51.077	0.892	31.120
	0.96 kV	3.792	24.781	57.774	4.004	43.584
	1.45 kV	7.976	24.678	65.413	8.457	47.761

3 结 论

为了获得较大的输出位移及缩短 SMA 材料的响应周期,设计并制备了 PBZ/PVDF@SMA 片式复合弯曲驱动器,采用溶液流延法在 SMA 片式弯曲驱动器表面涂覆 PBZ/PVDF 薄膜,室温下测试其输出性能,测量的内容包括输出位移的重复性及最大值、加热时间与冷却时间及多周期往复

循环驱动,同时与传统电流加热与自然冷却 SMA 片式弯曲驱动器作对比。实验结果表明:复合驱动器加热时间基本在 33 s 左右,这与传统电流加热时间相近(约 40 s);但冷却时间却相差较大,复合驱动器冷却时间约 64 s,而自然冷却时,当电流为 0.5 A 时其冷却时间为 86.85 s,2.0 A 时为 125.89 s,此后冷却时间基本都在 120 s 左右,此数值远大于复合驱动器冷却时间。在输出距离相近

的情况下(复合驱动器 3.792 mm, 传统方式 3.105 mm), 复合驱动器的冷却时间 57.774 s, 依然远小于自然冷却时间 86.851 s, 其循环周期得以减小 45 s 多, 且复合驱动器在 2.61 kV 下获得 17.25 mm 的最大输出距离, 综上可得在获得较大输出位移的情况下可以降低其冷却时间, 从而缩小循环周期, 复合弯曲驱动器表现出较佳的驱动性能, 通过软件仿真模拟 SMA 片弯曲驱动器加热及冷却过程, 进一步阐述了 PBZ/PVDF 薄膜对于 SMA 的加热及冷却过程。

参考文献:

- [1] 李雅格. 形状记忆合金驱动器力学性能及精确控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
LI Yage. Research on mechanical properties & precise control of SMA actuator[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [2] 郝林. 形状记忆合金鼓包力学特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
HAO Lin. Research on mechanical properties of shape memory alloy bump[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [3] 李珺, 陈永正. NiTi 形状记忆合金弹簧电热驱动特性研究[J]. 机械工程与自动化, 2024(6): 1-3, 6.
LI Jun, CHEN Yongzheng. Study on electrothermal driving characteristics of NiTi shape memory alloy spring[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2024(6): 1-3, 6.
- [4] 张肖肖, 陶哲, 杨浩, 等. 基于新型冷却方式的形状记忆合金驱动系统[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(11): 108-112.
ZHANG Xiaoxiao, TAO Zhe, YANG Hao, et al. Shape memory alloy driving system based on new cooling mode[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(11): 108-112.
- [5] MEKAOUCHE A, CHAPELLE F, BAL-ANDRAUD X. A compliant mechanism with variable stiffness achieved by rotary actuators and shape-memory alloy[J]. Meccanica, 2018, 53(3): 1-17.
- [6] LEE J H, CHUNG Y S, RODRIGUE H. Long shape memory alloy tendon-based soft robotic actuators and implementation as a soft gripper[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1-12.
- [7] 杨超, 廖雨欣, 卢海洲, 等. NiTi 形状记忆合金的功能特性及其应用发展[J]. 材料工程, 2024, 52(2): 60-77.
YANG Chao, LIAO Yuxin, LU Haizhou, et al. Functional properties of NiTi shape memory alloys and their application development[J]. Journal of Materials Engineering, 2024, 52(2): 60-77.
- [8] LANGE G, LACHMANN A, RAHIM A H A, et al. Shape memory alloys as linear drives in robot hand actuation[J]. Procedia Computer Science, 2015, 76: 168-173.
- [9] AGGOGERI F, PELLEGRINI N. Design and experimental validation of a shape memory alloy actuator for linear motors[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 783: 69-75.
- [10] 黄祥辉, 曹睿博, 郑睿恒, 等. 选区激光熔化 NiTi 形状记忆合金成形与热处理[J]. 机械工程学报, 2023, 59(17): 250-257.
HUANG Xianghui, CAO Ruibo, ZHENG Ruiheng, et al. Fabrication and heat treatment of selective laser melting produced NiTi shape memory alloy[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(17): 250-257.
- [11] PARK C H, CHOI K J, SON Y S. Shape memory alloy-based spring bundle actuator controlled by water temperature [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(4): 1798-1807.
- [12] 邱子辉. 基于形状记忆合金的复合材料驱动研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
QIU Zihui. Research on composite materials drive based on shape memory alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [13] 冯鑫晟, 韩青非, 邱稼辉, 等. 基于形状记忆合金的仿壁虎柔性脚掌设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(3): 427-436.
FENG Xinsheng, HAN Qingfei, QIU Jiahui, et al. Design of gecko-like flexible feet based on shape memory alloy[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 427-436.
- [14] 裘进浩, 季宏丽, 徐志伟, 等. 智能材料与结构及其在智能飞行器中的应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 867-888.
QIU Jinhao, JI Hongli, XU Zhiwei, et al. Smart materials and structures and their applications on smart aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 867-888.
- [15] SONG S H, LEE J Y, RODRIGUE H, et al. 35 Hz shape memory alloy actuator with bending-twisting mode[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-13.
- [16] UTTER B. Enhancing the actuation frequency of shape memory alloy wire by vibration-enhanced cooling [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(12): 1-13.
- [17] KNICK C R, SHARAR D J, WILSON A A, et al. High frequency, low power, electrically actuated shape memory alloy MEMS bimorph thermal actuators [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2019, 29(7): 1-10.
- [18] HUANG X, KUMAR K, JAWED M K, et al. High-

- ly dynamic shape memory alloy actuator for fast moving soft robots[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(4): 18005401-18005409.
- [19] VILLOSLADA A, FLORES-CABALLERO A, COPACI D, et al. High-displacement fast-cooling flexible shape memory alloy actuator: Application to an anthropomorphic robotic hand[C]//*Proceedings of 2014 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*. [S.l.]: IEEE, 2014: 1-6.
- [20] LU Y C, YU J, HUANG J, et al. Enhanced electrocaloric effect for refrigeration in lead-free polymer composite films with an optimal filler loading[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(23): 2339011-2339015.
- [21] ZHUO F, LI Q, GAO J, et al. Giant negative electrocaloric effect in (Pb,La)(Zr,Sn,Ti)O₃ antiferroelectrics near room temperature[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2018, 10(14): 1-29.
- [22] QIU Y, WU H, WANG J, et al. Giant electrocaloric effect in ferroelectric ultrathin films at room temperature mediated by flexoelectric effect and work function [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122: 0241031-02410311.
- [23] JIANG Z Y, ZHENG G P, ZHENG X C, et al. Exceptionally high negative electro-caloric effects of poly (VDF(-)co(-)TrFE) based nanocomposites tuned by the geometries of barium titanate nanofillers[J]. *Polymers (Basel)*, 2017, 315(9): 1-11.
- [24] YANG L, QIAN X, KOO C, et al. Graphene enabled percolative nanocomposites with large electrocaloric efficient under low electric fields over a broad temperature range[J]. *Nano Energy*, 2016, 22: 461-467.
- [25] PENG B, FAN H, ZHANG Q. A giant electrocaloric effect in nanoscale antiferroelectric and ferroelectric phases coexisting in a relaxor Pb_{0.8}Ba_{0.2}ZrO₃ thin film at room temperature[J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(23): 2987-2992.
- [26] QIAN G M, ZHU K J, LI X, et al. The electrocaloric effect of PBZ/PVDF flexible composite film near room temperature[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2021, 32(9): 12001-12016.
- [27] QIAN G M, ZHU K J, YANG Z, et al. Hot pressing process ameliorates internal defects of PBZ/PVDF composite film for a high electrocaloric effect near room temperature[J]. *Functional Materials Letters*, 2021, 15(1): 2251006.

(编辑:陈珺)