文章编号: 1007 - 4252(2022)03 - 0003 - 280 DOI: 10.20027/j.gncq.2022.0032

自快速冷却鞘芯微纳结构的形状记忆合金致动器的研究

韦 超[1],周小双[2],李明霞[1],袁宁一[1,*],丁建宁[1,2,*]
(1. 常州大学 材料与工程学院,常州 213164; 2. 江苏大学 机械工程学院,镇江 212013)

摘要: 形状记忆合金(shape memory alloys, SMA)电热致动器因其具有高柔性、高力重比等特点,既可以应用于航空航天机翼,又可以应用于微创手术中。为了更好地满足实际应用,需要解决大尺寸的 SMA 电热致动器冷却慢的问题。这里我们设计了一种鞘芯结构的 SMA 复合致动器,在 SMA 表面构造了微纳散热通道,将热量通过高导热的碳纳米管从 SMA 快速地径向传递给散热系数高的氮化硼纳米片(boron nitride nanosheets, BNNS)。利用商用 SMA 制备的尺寸可调复合致动器,冷却时间缩短了 50%,工作频率提高了 1 个数量级,行程 33%,输出力 70 MPa,实现了快速循环,可用于多种应用。

关键词: 形状记忆合金电热致动器; 自快速冷却; 鞘芯微纳结构; 工作频率
中图分类号: TH142.2 **文献标识码:** A

Self Fast Cooling Sheath-core Micro-nano Structure for Shape Memory Alloys Actuators

WEI Chao[1], ZHOU Xiao-shuang[2], LI Ming-xia[1], YUAN Ning-yi[1,*], DING Jian-ning[1,2,*]
(1. School of materials science and engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhengjiang 212013, China)

Abstract: Shape memory alloy (SMA) electrothermal actuators are useful in aerospace wings and minimal invasive surgeries because of their high flexibility and high force-to-weight ratio. We designed a sheath-core-structured SMA composite actuator with micro-nano heat dissipation channels constructed on the SMA surface to increase the cooling rate of large SMA electrothermal actuators. The function of the channels is to rapidly transfer heat radially from the SMA to boron nitride nanosheets (BNNS) with a high heat dissipation coefficient through high thermally conductive carbon nanotubes. The composite actuator fabricated herein using a commercial SMA exhibits an increase in operating frequency by one order of magnitude, 50% reduction in cooling time required for reply, 33% stroke, and output force of 70 MPa, realized fast-cycling and were prepared for use in several applications.

Key words: Shape memory alloy electrothermal actuator; Self-fast cooling; Sheath-core micro-nano structure; Working frequency

收稿日期: 2022-04-01; **修订日期:** 2022-05-13

作者简介: 韦 超(1997-),男,硕士,主要研究方向为柔性材料与器件(E-mail: 1099424855@qq.com).
通信作者: 丁建宁(1966-),男,博士,教授,研究方向为纳米材料、新能源材料与器件(E-mail: dingjn@cczu.edu.cn).

0　引言

近年来,柔性致动器的高速发展已经引起了世界各地研究人员的广泛关注,它在许多重要场合都有广泛的应用,如软机器人、人工肌肉、细胞支架、机械手、调光和传感[1-5]。在所有类型的致动器中,电热致动器(ETA)由于其形变大、响应快速、制造简单、基底灵活、驱动电压低等特性[6-7],在仿生机器人手臂、汽车零件和航空航天智能机翼中有很大的应用前景。

其中,形状记忆合金(SMA)电热致动器的研究也成为了一个热门话题。然而,SMA 电热致动器的回复慢限制了它在高频致动器方面的应用[8-9],这种限制可以归因于 SMA 相变后热导率的降低,以及进行数个循环后热量叠加导致的应变下降[10-12]。为了解决这些问题,研究人员已经使用了多种方法,例如通过扩大比表面积和使用外部冷却装置来减少循环时间[13-16]。Taylor[17] 等人使用两根 0.2 mm SMA 线制备了一只假手。通过使用风扇强制冷却,冷却时间从 9.5 s 减少到 3.5 s。此外,Cheng[18] 等人展示了由硅管组成的弹簧 SMA 人工肌肉。以水作为冷却介质,通过空气介质来驱逐水,实现了极高的驱动速度。这种冷却方法将所需的冷却时间减半,使驱动频率高达 1.67 Hz。高频致动器也可以通过增加 SMA 的比表面积来实现。Song 等人[19] 开发了一种由多个 38 μm 导线组成的智能软复合致动器,实现了 10 Hz 的驱动频率。虽然外部冷却装置有效的缩减了冷却时间,但是相对庞大的系统,不仅仅使致动器变得复杂,而且使功耗大大增加。尽管微米级的 SMA 驱动频率可以实现几赫兹甚至几十赫兹,可是低应力等问题限制了它在人工肌肉、航空航天方面的应用。

在本研究中,我们制备了一种具有鞘芯结构的自快速冷却 SMA 复合致动器。通过喷涂,将氮化硼纳米片(BNNS)均匀分散在碳纳米管(CNT)层之间,在 SMA 表面构建了由高导热 CNT 和高散热 BNNS 组成的微纳米通道。我们发现,BNNS 的比表面积相较于 SMA 更大,提高了复合致动器的散热面积和导热系数,因此,解决了其冷却慢和热量堆叠的问题。

1　实验部分

1.1　BNNS 的制备

六方氮化硼(h-BN)的熔融碱辅助剥离有两个步骤[20]。首先,将 NaOH(2.84 g)和 KOH(2.16 g)精细研磨,然后添加 h-BN 粉末(1.0 g)。将该混合物进一步研磨均匀,并转移至 100 mL 的聚四氟乙烯不锈钢高压釜中。将密封的高压釜加热并在 180 ℃下保持 2 h。冷却至室温后,从高压釜收集固体产物并将其分散在 300 mL 去离子水中。使用尖端超声仪将分散体超声处理 1 h。随后,将样品过滤,通过水浴超声处理再分散在去离子水中 10 min,然后以 2 500 rpm 离心 30 min 以除去氢氧化物和其他未反应的物质。离心后,收集产物的上清液作 BNNS。

1.2　SMA-BNNS 复合致动器的制备

本实验所使用的是商用 NiTi SMA,其原子比为 Ti 49.2%、Ni 50.8%,合金丝的直径为 0.135 mm,相变温度在 35 ℃左右。制备 SMA-BNNS 复合致动器的方法如图 1 所示,SMA 复合致动器由 BNNS、CNT 复合的降温层和 SMA 组成,我们选用直径 1.35 mm的商用 SMA 作为主体材料。先将玻璃板在 80 ℃的烘箱中烘 5 min,拿出后将制备好的 BNNS 溶液均匀喷在其表面,此时 BNNS 溶液瞬间烘干,BNNS 分布在玻璃板上。然后将拉好的碳膜承载覆盖在上面,上述操作重复 5 次,用自制的模具将玻璃板安装好,然后通过使 SMA 滚动的方式,将制备好的 BNNS-CNT 结构裹覆在 SMA 表面。经过多次的测试,发现 SMA 复合致动器的基膜并未出现剥离现象。

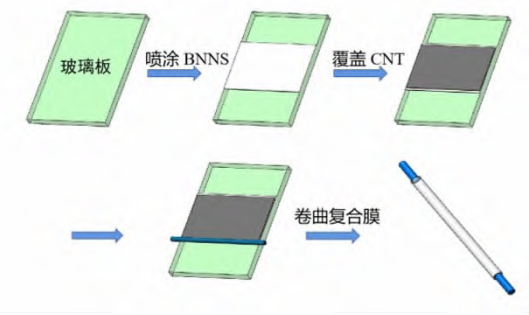

图 1　SMA-BNNS 复合致动器制备图

Fig. 1 Preparation of SMA-BNNS composite actuator

1.3 形貌表征与结构分析

扫描电子显微镜(SEM):主要用来观测 BNNS 在 CNT 内的分布情况及形貌特征,根据结果分析 BNNS 在整个致动器中起的作用。

X 射线衍射(XRD):主要是对比 h-BN 和 BNNS 的衍射峰,验证是否制备出了 BNNS。

1.4 位移时间曲线的测试分析

本文中使用的是位移传感器配合 Thermal Measurement 软件进行测试,通过调整占空比、电压和通电频率来绘制位移时间及循环图。通过控制砝码的质量来绘制应力和致动形变图。SMA 复合致动器的工作频率可以通过等式(1)来描述:

$$f_w = \frac{1}{t_h + t_c} \tag{1}$$

其中 f_w 为 SMA 的工作频率,单位为 Hz,t_h 为 SMA 的加热时间,t_c 为 SMA 的冷却时间,单位为 s。

SMA 的输出力计算可以通过等式(2)来描述:

$$\delta = \frac{m_0 g + m_1 g}{s} \tag{2}$$

其中 δ 为输出力,单位为 MPa,$m_0 g$ 为初始 SMA 的力,$m_1 g$ 是砝码的力,s 为 SMA 的横截面积,当 SMA 是直线型时,横截面积为 $s = \pi r^2$,单位为 m,当 SMA 是弹簧型时,要测量弹簧此时的横截面半径。

2 结果与讨论

2.1 形貌表征及致动机理的研究

图 2 为制备的 BNNS 的透射电镜(TEM)图和 XRD 图谱。未完全剥离的 h-BN 粉末清楚地表明,插层反应在 h-BN 各处发生。相邻边缘之间的间距和层数分别为 0.325 nm 和 15 层。由于六边形晶体结构,相应的电子衍射图案显示了 BNNS 典型的六重对称(插图)。BNNS 的 XRD 图 2(b)所示,分别在 26.9°、42.8°和 46.0°处出现衍射峰,分别对应于 h-BN 的(002)、(100)和(101)平面,表明在制备的 BNNS 中没有发现中间体。

图 3 为 BNNS 在 SMA 复合致动器表面均匀分布的 SEM 图像。制备的 BNNS 在 CNT 表面分散得很开,BNNS 的插入显著增加了径向上的散热面积。制备的 SMA 复合致动器长度为 60 mm,直径为 1.5 mm。

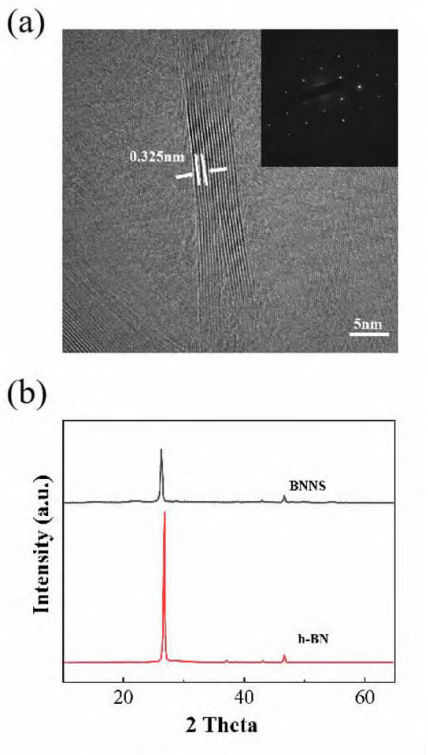

图 2 (a) BNNS 的 TEM 图;(b) h-BN 和制备的 BNNS 的 XRD 图谱

Fig. 2 (a) TEM of as-prepared BNNS; (b) XRD patterns of h-BN and as-prepared BNNS

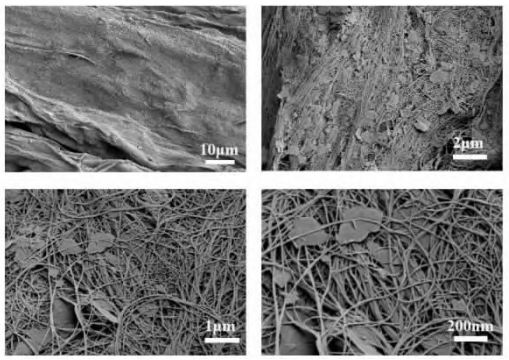

图 3 BNNS 复合材料表面的扫描电镜图像

Fig. 3 SEM images of the BNNS composites surfaces

图 4 显示了整个 SMA 复合致动器的致动机理示意图。通电后,SMA 由马氏体转变为奥氏体,并收缩。同时 CNT 层通电发热,使得 SMA 层实现更快速的致动。断开后,SMA 中的热量通过 CNT 转移到有较大冷却区域的 BNNS 层。然后,热量迅速从 BNNS 转移到空气中,这种在 SMA 表面构造的散热通道,实现了快速冷却,此时 SMA 复合致动器恢复

到其原始状态。

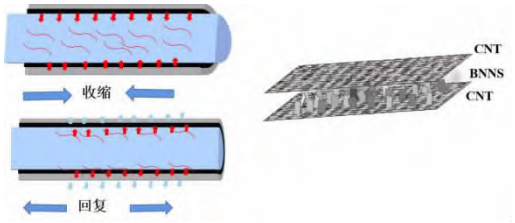

图 4　SMA 复合致动器的驱动机理及微纳米通道图

Fig. 4 Driving mechanism of micro andnano channel of SMA composite actuator

2.2　冷却效果的测试

对 SMA 复合致动器在不同频率下的位移时间曲线进行测试。我们发现在 0.1 Hz、0.15 Hz、0.2 Hz的情况下,SMA 复合致动器均能回复到初始状态。且在 0.1 Hz 和 0.2 Hz 的位移均能达到 3.5 mm。在测试 SMA 商用合金时,我们发现商用 SMA 仅能在 0.1 Hz 的通电频率下,恢复到初始状态。在 0.5 Hz 时,由于加热冷却时间均为 1 s,虽然也可以收缩很大,但是回复却极小,SMA 位移仅在 0.5 mm 之内。制备的 SMA 复合致动器却能达到 1.5 mm,在 0.5 Hz 频率下致动形变仍然能够达到 3% 左右。

为了证明制备的冷却装置确实有效果,分别选用了几种不同的高热导率材料(氮化硼(BN)、BNNS、氧化石墨烯(GO))进行降温层的制备。在此之前,先制备了 SMA-CNT 的复合致动器,发现裹上 CNT 后对 SMA 的快速循环并无大的影响(图 5(a))。紧接着对比了几种高导热材料对 SMA 复合致动器位移时间曲线变化的影响(图 5(b)),加入 BN 等材料后自然冷却回复所需时间更短。通过多组数据比较,发现冷却所需的时间缩短了 30% ~ 40%。

对比了 BN、BNNS、GO 这几种高热导率材料后,发现 BNNS 材料对提高冷却效果更有效,因此,对不同含量的 BNNS 对 SMA 复合致动器位移时间变化曲线的影响进行了研究,分别制备了 10 mL、15 mL、20 mL 的 BNNS 溶液,直至完全喷涂在 CNT 上,烘干后进行测试,发现随着含量的增加,冷却的时间明显缩短,最大缩减了 40% ~50% 左右(图 6(a))。除了材料上的选择、量的选择,降温层的结构设计也会影响 SMA 复合致动器的循环时间。同轴加捻的方式是先将 CNT 拉好,直接利用机器同轴加捻到 SMA 表面,然后将之浸泡在制备好的 BNNS 溶液当中,这种方式虽然让整个致动器的表面都接触了 BNNS 溶液,但是浸上去的 BNNS 的量我们无法控制,相比之下,改良后卷曲的方式,即先将 BNNS 与 CNT 结合好后再包覆到 SMA 上,使得 BNNS 的量可以控制,且冷却效果也更好(图 6(b))。

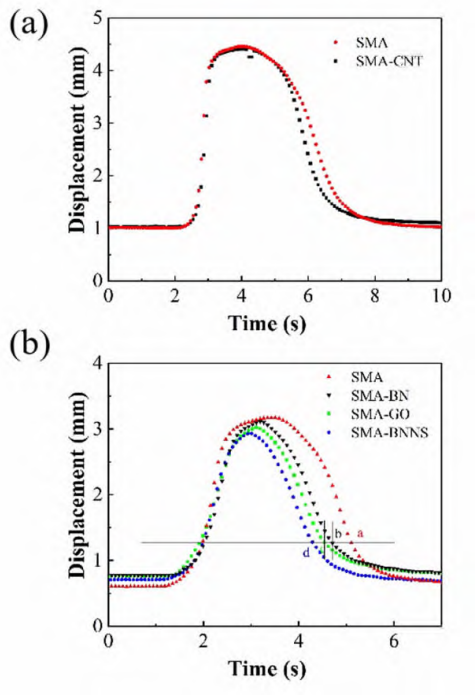

图 5　位移时间变化曲线(a) CNT 的影响;(b) 冷却材料的影响

Fig. 5 (a) Displacement time change curve (a) influence of CNT; (b) influence of cooling material

此外,为了测试制备的 SMA 复合致动器是否能够在大尺寸时依旧保持有这种快速回复的效果。我们还测试了大尺寸 SMA 复合致动器的冷却效果,使用相同的制备方法,这次将 SMA 取 30 cm 的长度,在相同电压和通电时间下,该 SMA 复合致动器冷却效果更好(图 7),在 10 ~ 16 s 期间已经达到了位移传感器的极限,最大测试范围仅为 5 ~ 6 mm,经过测量其已经达到了最大致动形变距离。明显可以看到该 SMA 复合致动器更加快速的恢复到了初始状态,这种冷却效果和致动形变的大小跟小尺寸的相差不大,冷却效果约 40%。

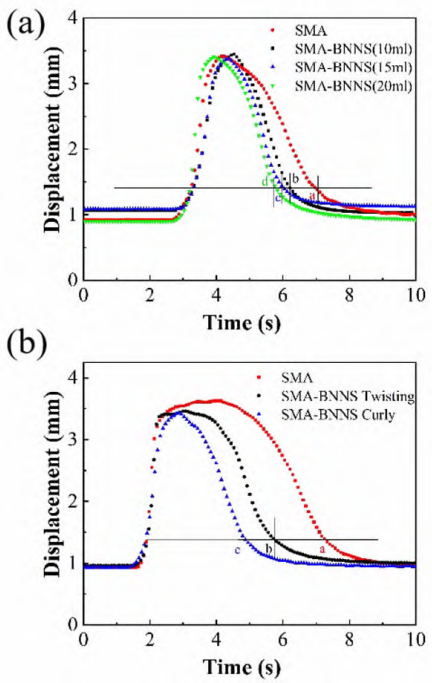

图 6 位移时间变化曲线(a) BNNS 含量的影响; (b) 扭转方法的影响

Fig. 6 Displacement time change curve (a) influence of BNNS content; (b) influence of torsion method

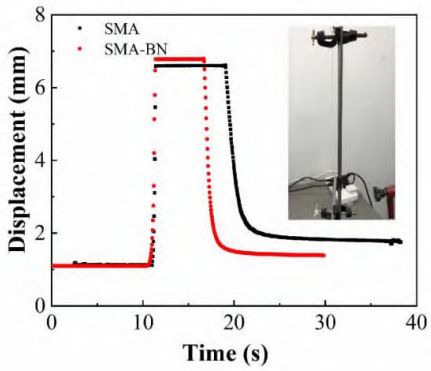

图 7 30 cm SMA 复合致动器位移时间曲线

Fig. 7 30 cm SMA composite actuator displacement time curve

2.3 占空比和温度的影响

占空比和温度对整个 ETA 也有着影响。我们发现当驱动时间和回复时间一致时,SMA 复合致动器往往不能回到初始位置,通过改变占空比可以实现它的最大的循环致动效果。图 8 是 SMA 复合致动器负载为 24 MPa,在 0.2 Hz 通电频率下,占空比分别为 0.1、0.3、0.5 时的位移时间曲线图,在占空比为 0.3 时,可达到最大的致动形变循环。

随后我们测试了温度对致动器的影响,发现通电频率为 0.2 Hz 时,SMA 复合致动器的温度变化比 SMA 更大,但是 SMA 在每一次循环过后,温度上升的明显比 SMA 复合致动器更高,SMA 复合致动器由于降温层的缘故,在冷却的过程中温度可以降到更低(图 9(a)) 。通电频率为 0.5 Hz 时,由于整个循环时间仅 2 s,SMA 的温度变化并不大,且随着循环次数的增加,温度最低都高于 30 ℃。而 SMA 复合致动器的温度变化范围更大,虽然在通电时产生的热量更高,温差变化更大,但是在断电后,SMA 复合致动器反而温度均降低到 30 ℃以下(图 9(b)) 。

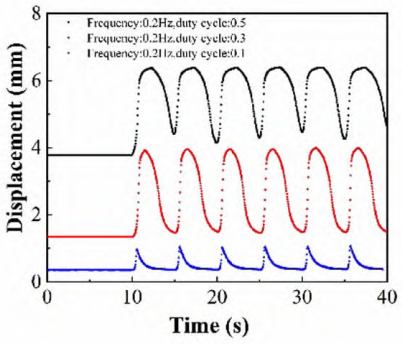

图 8 占空比的影响

Fig. 8 Impact of duty cycle

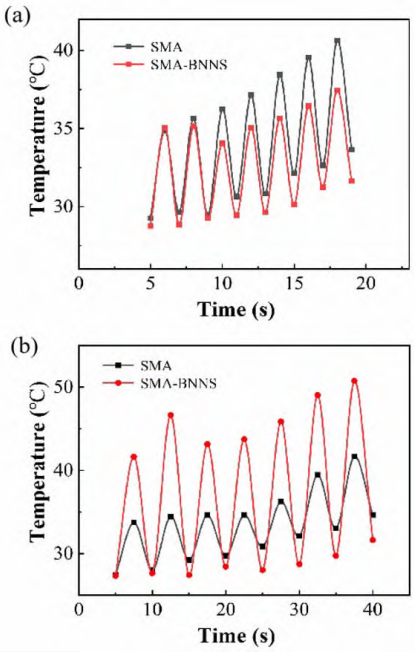

图 9 (a) 0.2 Hz 频率下温度变化曲线图; (b) 0.5 Hz 频率下温度变化曲线图

Fig. 9 (a) Temperature change curve at 0.2 Hz; (b) Temperature change curve at 0.5 Hz

2.4　应力应变曲线

通过对比直线型 SMA 与弹簧型 SMA 负载应变的影响(图 10),我们发现直线型的 SMA 随着负载的增大,直至 100 g,应变一直维持在 3% 左右,稳定性很好。相比之下,弹簧型的 SMA 随着负载的增加,它的应变先变大后变小,当负载约为 25 g 时,它的应变最大,约为 30%。随着负载的增加,它的弹簧形状逐渐消失,但是负载加大到 100 g 时,应变仍然能够达到 10% 左右。因此,直线型的 SMA 虽然应力大但是应变过小,极大地限制了它的应用,故我们可以先制备成弹簧型的 SMA,随后对弹簧型 SMA 进行预拉伸,直至它失去弹簧形状,此时呈现出“Z”字型,这样它既可以达到不错的应变效果又可以在不影响回复的情况下,实现高应力。经过测试,弹簧型 SMA 复合致动器可以在负载 200 g 重物的情况下进行驱动,且驱动应变在 4% 左右,此时输出力可达 70 MPa。

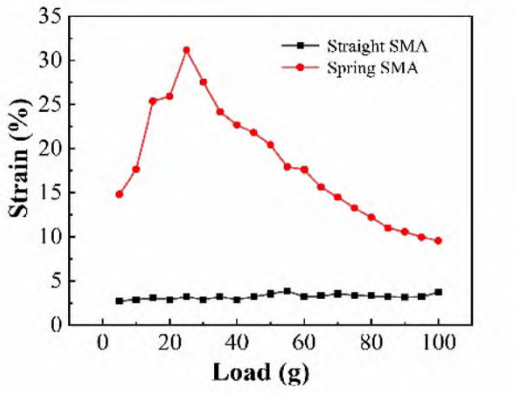

图 10　直线型与弹簧型的 SMA 随着负载变化的应变对比图

Fig. 10 Strain comparison diagram of straight and spring SMA changing with load

在实验的过程中,我们发现相同电压时,致动器的电阻也在变化。SMA 的电阻比 SMA 复合致动器的更大,因为当电流通过整个致动器时,由于 SMA 复合致动器表面裹覆了一层 CNT,电流会往电阻小的方向流动,这样电流会直接通过 CNT 来给整个致动器加热,使其致动,但是相比之下,由于外层的 CNT 加热,所以散热会更快(图 11)。我们还对比了不同方式制备的 SMA-BNNS 致动器电阻变化,发现通过加捻制备的 SMA 复合致动器在通电时电阻可达到 50 kΩ。

2.5　应用

为了充分利用致动器的性能,我们制备了一个三爪的机械手,图 12 显示了手指设计的示意图,所有的手指部件均由 3D 打印机打印制备而成。手指包括主动和拮抗配置的驱动系统,其中扭簧放置于关节处,致动器置于后半部分。在此设计中,扭簧与用于手指伸展/弯曲的致动器结合使用,扭簧同时为手指提供预紧力。通电时,SMA 复合致动器收缩,拉动手指弯曲;断电后,SMA 复合致动器恢复原状,扭簧提供快速的扭转力使手指恢复原状。仅仅只需要 4 V 的电压,就可以使整个手运动,实现了在低电压下快速抓取和释放,其中整个收缩和释放的过程仅在 10 s 内完成。

图 11　通电前后 SMA 与 SMA 复合致动器的电阻变化图

Fig. 11 Resistance change graph of SMA and SMA composite actuator when energized

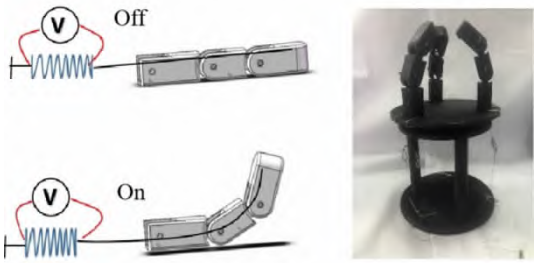

图 12　由 3D 打印制备的机械爪

Fig. 12 Mechanical claws prepared from 3D printing

3　结论

在本研究中,我们制备了由 SMA 和 BNNS 组成的具有自快速冷却功能的 SMA 复合致动器,通过在 SMA 表面构造快速降温层,将激发产生的热量从 SMA 本身通过 CNT 结构层快速传递到 BNNS 中,大

幅度缩短了 SMA 的冷却时间(50% 左右),实现了可以快速循环的 SMA 电热致动器。

通过测试 SMA 的冷却效果、循环效果、占空比和温度的影响及应力应变,发现 SMA 复合致动器的冷却效果很好。通过调整占空比,发现可以通过缩减通电时间、略微增加电压,增长它的冷却时间。相比于占空比 0.5 时的更大位移,最终发现占空比为 0.3 时,SMA 复合致动器最合理且能达到最大位移。通过测试 SMA 复合致动器的应力应变,发现当 SMA 复合致动器中商用 SMA 结构为“Z”字型时,可以达到更大的应变。通过对温度的测量,发现 SMA 温差变化较为明显。

弹簧式的 SMA 复合致动器可以拉起本身 60 倍的重物,同时保持较高的拉伸应变。本研究中,还使用 SMA 复合致动器制备了三爪的机械手,可以抓起多种重物。此致动器为实现快速循环驱动的机器人提供了可能。

参考文献:

[1] Schaffner M, Faber J A, Pianegonda L, et al. 3D printing of robotic soft actuators with programmable bioinspired architectures [J]. Nature communications, 2018, 9(1): 1-9.

[2] Apsite I, Salehi S, Ionov L. Materials for Smart Soft Actuator Systems [J]. Chemical Reviews, 2021, 122(1): 1349-1415.

[3] Youn J H, Jeong S M, Hwang G, et al. Dielectric elastomer actuator for soft robotics applications and challenges [J]. Applied Sciences, 2020, 10(2): 640.

[4] Majidi C. Soft-matter engineering for soft robotics [J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(2): 1800477.

[5] Hartmann F, Baumgartner M, Kaltenbrunner M. Becoming sustainable, the new frontier in soft robotics [J]. Advanced Materials, 2021, 33(19): 2004413.

[6] Tian Y, Li Y T, Tian H, et al. Recent progress of softelectrothermal actuators [J]. Soft Robotics, 2021, 8(3): 241-250.

[7] Chen G, Yang Z, Wang W, et al. Electrothermal Actuators with Ultrafast Response Speed and Large Deformation [J]. Advanced Intelligent Systems, 2020, 2(8): 2000036.

[8] He W, Li Z, Chen C L P. A survey of human-centered intelligent robots: issues and challenges [J]. IEEE/CAA Journal ofAutomatica Sinica, 2017, 4(4): 602-609.

[9] Giffney T, Xie M, Yong A, et al. Soft pneumatic bending actuator with integrated carbon nanotube displacement sensor [J]. Robotics, 2016, 5(1): 7.

[10] Foroughi J, Spinks G. Carbon nanotube and graphene fiber artificial muscles [J]. Nanoscale Advances, 2019, 1(12): 4592-4614.

[11] Sang W, Zhao L, Tang R, et al. Electrothermal actuator on graphene bilayer film [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2017, 302(12): 1700239.

[12] Aouraghe M A, Mengjie Z, Qiu Y, et al. Low-Voltage Activating, Fast Responding Electro-thermal Actuator Based on Carbon Nanotube Film/PDMS Composites [J]. Advanced Fiber Materials, 2021, 3(1): 38-46.

[13] Chernyshov G, Tag B, Caremel C, et al. Shape memory alloy wire actuators for soft, wearable haptic devices [C]. //Proceedings of the 2018 ACM International Symposium on Wearable Computers. 2018: 112-119.

[14] Lu Y, Xie Z, Wang J, et al. A novel design of a parallel gripper actuated by a large-stroke shape memory alloy actuator [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 159: 74-80.

[15] Li J, Sun M, Wu Z, et al. Design, analysis, and grasping experiments of a novel soft hand: Hybrid actuator using shape memory alloy actuators, motors, and electromagnets [J]. Soft Robotics, 2020, 7(3): 396-407.

[16] Copaci D, Cano E, Moreno L, et al. New design of a soft robotics wearable elbow exoskeleton based on shape memory alloy wire actuators [J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2017: 1605101.

[17] Taylor F, Au C K. Forced air cooling of shape-memory alloy actuators for a prosthetic hand [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2016, 16(4): 041004.1-041004.5.

[18] Cheng SS, Kim Y, Desai J P. New actuation mechanism for actively cooled SMA springs in a neurosurgical robot [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(4): 986-993.

[19] 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.

[20] Fu L, Wang T, Yu J, et al. An ultrathin high-performance heat spreader fabricated withhydroxylated boron nitride nanosheets [J]. 2D Materials, 2017, 4(2): 025047.