多场耦合操控石墨烯柔性机器人

任天令

清华大学微电子学研究所, 北京 100084

E-mail: rentl@tsinghua.edu.cn

Manipulation of graphene-based soft robots by a multi-field-coupling strategy

Tian-Ling Ren

Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

E-mail: rentl@tsinghua.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2020-0807

随着柔性电子器件的飞速发展,以软体机器人为代表的柔性微机械也成为国内外研究人员关注的前沿和热点^[1,2]。相比于传统硬质材料的机器人,软体机器人不但可以独立行走、捕捉和识别信号,还能够很好地适应恶劣崎岖的工作环境、模拟生命体的复杂运动、实现人机共融机器人的目标,在生物医学、军事探测等方面具有重要的研究意义。柔性机器人在设计制作时必须综合考虑能量供给方式和操控方法。其中,对外部刺激信号的有效识别、耦合和能量转换等过程是实现机器人功能的关键。相比于传统电驱动机器人的能量供应系统或微机电系统(MEMS),柔性机器人更倾向于从周围环境获取能量,实现非接触操控(如光、热、湿度、磁场等)^[3-5],这样可以最大程度地简化机器人的器件结构,同时还可以扩大其适用范围。目前,对刺激响应性柔性机器人的设计与操控大多局限在对单一驱动能源的探索。这些工作虽然细致研究了某一特定信号对机器人的控制(如“关节”部位弯曲程度、响应速度等),但所实现的运动功能相对简单,难以进行复杂的变形或多维度多模式运动控制。

近年来,石墨烯氧化物材料(graphene oxide, GO)凭借其优异的物理化学性质逐渐成为一种多用途的功能材料。它可以在水中形成稳定的溶液,结合溶液处理方式制备成连续的薄膜、纤维、条带、泡沫和纸张等结构^[6]。此外,石墨烯氧化物还具有独特的湿度愈合能力、良好的生物相容性、轻质、高机械强度和易于刺激形变等优点。例如,石墨烯氧化物对环境湿度敏感,大量含氧官能团(oxygen containing group, OCG)的存在,可以迅速地结合空气中的水分子导致材料体积发生变化^[7];石墨烯氧化物具有良好

的光热转化能力,可以应用于光驱动器件的设计。将石墨烯氧化物作为换能材料与一种惰性材料形成双层结构就可以实现湿度/光能与机械能之间的有效转化,最终应用于机器人的设计。然而,这种双层结构在频繁的弯曲变形下并不稳定:石墨烯氧化物与异质材料之间结合属于微弱的范德华作用力,在弯曲过程中材料界面处产生的应力失配现象可能引起两种材料的分离,最终导致驱动失效。因此,开发一种稳定可控的驱动结构是制造石墨烯柔性机器人一个必须突破的难题。

吉林大学张永来教授和清华大学孙洪波教授研究团队一直致力于石墨烯智能机器人方面的研究,先后研制了光驱动蜘蛛机器人^[8]以及湿度驱动蜈蚣机器人^[9]等。为了赋予石墨烯机器人更多功能,他们近期采用梯度化组装磁性纳米材料和石墨烯氧化物的方法制备了一种非均匀的杂化材料智能薄膜,结合多场耦合操控技术实现了机器人的复杂运动控制过程^[10]。该工作巧妙结合了磁、光、湿度、超声四种物理场对机器进行耦合操控,实现目标物体的靶向捕获、定向释放、悬浮抓取等连续功能的控制(图1),并在*Nano Energy*发表了题为“Multi-field-coupling energy conversion for flexible manipulation of graphene-based soft robots”的论文。

该工作采用磁场辅助四氧化三铁纳米粒子(Fe_3O_4 NPs)梯度化组装的材料制备新方法,实现了磁性纳米粒子在石墨烯氧化物薄膜中的梯度分布,不仅有效避免了双层驱动结构材料之间分离剥落导致器件失效的难题,还形成了一种非对称的 Fe_3O_4 NPs@GO杂化材料智能薄膜,一面富含 Fe_3O_4 NPs,另一面主要由GO组成(图2)。这种复合材

图 1 (网络版彩色)多场耦合操控原理示意图. 结构非常简单的机械手在多种物理场协同控制下可以实现复杂的运动功能^[10]
Figure 1 (Color online) Design principle of multi-field-coupling manipulation strategy. A simple claw with distinct actions is controlled under specific stimuli. Complex and cooperative motilities are realized by various energies cooperative conversion driving method^[10]

图 2 (网络版彩色)磁场辅助 Fe_3O_4 NPs在石墨氧化物薄膜中梯度分布. (a) 梯度薄膜制备过程示意图; (b) 不同磁场强度诱导下磁性纳米粒子分布状态^[10]

Figure 2 (Color online) Magnetic field assisted gradient distribution of Fe_3O_4 NPs in GO films. (a) Design and fabrication of gradient Fe_3O_4 NPs@GO films. (b) Distribution of Fe_3O_4 NPs in different samples prepared under different magnetic intensities^[10]

料梯度薄膜可以用于制备多场耦合远程操控的机器人, 包括磁、光、湿度以及声场控制. Fe_3O_4 NPs的存在使复合材料具有磁性; Fe_3O_4 NPs的不对称分布影响石墨烯材料两侧

对水分子的吸附程度和光热脱附过程; 复合材料很轻, 密度约 0.3 g/cm^3 , 很容易在超声波下实现悬浮, 让机器人实现完全非接触式控制.

在上述制备方式和操控方式的指导下,他们采用这种梯度复合材料制作了一个非常简单的机械手(两个条形复合材料十字交叉后贴合),可以在四种能量场控制下实

现在悬空、水面上或悬浮等环境条件下对目标物体的定向捕获、靶向转移、以及释放等多模式运动的连续控制过程。

参考文献

- 1 Laschi C, Mazzolai B, Cianchetti M. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities. *Sci Robot*, 2016, 1: UNSP eaah3690
- 2 Shintake J, Cacucciolo V, Floreano D, et al. Soft robotic grippers. *Adv Mater*, 2018, 30: e1707035.
- 3 Kim Y, Yuk H, Zhao R, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials. *Nature*, 2018, 558: 274–279
- 4 Han B, Zhang Y L, Chen Q D, et al. Carbon-based photothermal actuators. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1802235
- 5 Taccola S, Greco F, Sinibaldi E, et al. Toward a new generation of electrically controllable hygromorphic soft actuators. *Adv Mater*, 2015, 27: 1668–1675
- 6 Cheng H, Huang Y, Shi G, et al. Graphene-based functional architectures: Sheets regulation and macrostructure construction toward actuators and power generators. *Acc Chem Res*, 2017, 50: 1663–1671
- 7 Han D D, Zhang Y L, Jiang H B, et al. Moisture-responsive graphene paper prepared by self-controlled photoreduction. *Adv Mater*, 2015, 27: 332–338
- 8 Han B, Zhang Y L, Zhu L, et al. Plasmonic-assisted graphene oxide artificial muscles. *Adv Mater*, 2019, 31: e1806386
- 9 Zhang Y L, Liu Y Q, Han D D, et al. Quantum-confined-superfluidics-enabled moisture actuation based on unilaterally structured graphene oxide papers. *Adv Mater*, 2019, 31: e1901585
- 10 Han B, Gao Y Y, Zhang Y L, et al. Multi-field-coupling energy conversion for flexible manipulation of graphene-based soft robots. *Nano Energy*, 2020, 71: 104578