

电活性材料驱动的柔性光子晶体结构 色调调控技术研究进展

赵鹏飞^{1,2,3}, 李博², 程丽霞³, 刘继全⁴, 陈花玲²

(1. 太原工业学院机械工程系, 030008, 太原; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 3. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 030051, 太原; 4. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司, 030032, 太原)

摘要: 针对柔性光子晶体结构变色范围小、柔性不足的问题,对柔性光子晶体结构色调调控方法进行了综述,介绍了结构变色的作用机理、载体材料和主要调控方法,对电场型、离子型、电热型电活性材料的变形速度、响应时间、驱动电压、能耗量级和最大应变进行了归纳和对比。对电致结构色调调控技术的国内外研究现状进行了归纳和分析,并对各种代表性电致变色技术的变色范围、杨氏模量、驱动电压等主要性能参数进行了对比。通过分析发现传统电致变色技术难以兼顾柔性好、低驱动电压和大变色范围。在全面回顾文献的基础上重点阐述了电活性材料驱动的柔性光子晶体结构色调调控技术发展现状,阐明了这种结构色调调控方式具有柔性好、易封装、响应模式丰富等独特优势,总结出电活性材料驱动的柔性光子晶体结构色调调控是电致结构变色领域中最具发展潜力的技术,同时指出了其面临的问题以及未来的发展趋势。

关键词: 电活性材料;电致变色;柔性光子晶体;结构色调调控;驱动

中图分类号: TP212.1;O734 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202307008 **文章编号:** 0253-987X(2023)07-0084-17

Research Progress in Technology of Flexible Photonic Crystal Structural Color Control Actuated via Electroactive Materials

ZHAO Pengfei^{1,2,3}, LI Bo², CHENG Lixia³, LIU Jiquan⁴, CHEN Hualing²

(1. Department of Mechanical Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China;
2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. State Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
4. China Coal Technology & Engineering Group Taiyuan Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: In terms of the small range and insufficient flexibility of flexible photonic crystal structural color change, the structural color control method of flexible photonic crystals is reviewed. The mechanism, carrier materials and main methods of structural color control are introduced. The deformation velocity, response time, actuating voltage, energy consumption and maximum strain of dielectric, ionic and thermal electroactive materials are summarized and compared. The research progress in electrochromic technology at home and abroad is summarized and analyzed, and the main performance parameters such as color change range, Young's modulus and driving

收稿日期: 2023-01-11。 作者简介: 赵鹏飞(1984—),男,博士,副教授;李博(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52075411);山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(202201140601023);太原工业学院引进人才科研资助项目(21020213)。

网络出版时间: 2023-03-26

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20230324.1745.003.html>

voltage of various representative electrochromic technologies are compared. It is found that it is difficult for traditional electrochromic technology to balance among good flexibility, low actuating voltage and a large color change range. On the basis of a comprehensive review, this paper focuses on the development status of flexible photonic crystal structural color control technology actuated via electroactive materials, and clarifies the unique advantages of this structural color control method, such as good flexibility, easy packaging, and multiple response patterns. Finally, this paper summarizes that the flexible photonic crystal structural color control technology actuated via electroactive materials is the most promising technology in the field of electrochromism, and also points out the problems faced by as well as the future developing trend of this technology.

Keywords: electroactive materials; electrochromism; flexible photonic crystal; structural color regulation; actuation

在科技领域和日常生活中,颜色是人类活动中一种具有重要意义的生理感知现象和信息载体。随着信息技术的快速发展,颜色的作用不仅体现在传统美和艺术等提高人类视觉享受的领域,还向世界提供着日益丰富的功能和信息。根据光学现象的产生机制,颜色可以分为色素色和结构色,前者通过色素分子对特定波长光的选择性吸收及对其他波长光的反射产生某种颜色;后者颜色的产生源于有序排列的纳米结构与特定波长的光之间相互作用,引起布拉格散射和反射从而产生某种颜色,称其为结构色^[1-2]。与色素色相比,结构色具有优秀的颜色稳定性,同时避免了色素色中普遍存在的有毒有害物质,因此受到研究人员的广泛关注。受到自然界中蛋白石^[3]、甲虫^[4-5]、热带鱼^[6]、孔雀羽毛^[7]、变色龙等^[8-11]大量存在的结构色载体启发,研究者开始对结构色及其载体材料进行深入研究,试图探索结构色变化与外界的多种交互关系,开发以结构色及其载体材料为媒介的信息显示、感知、处理工具,以期广泛应用在如图 1 所示的信息科学、生物医疗、人类辅助、动态显示、柔性传感、军事科学等领域^[12-23]。

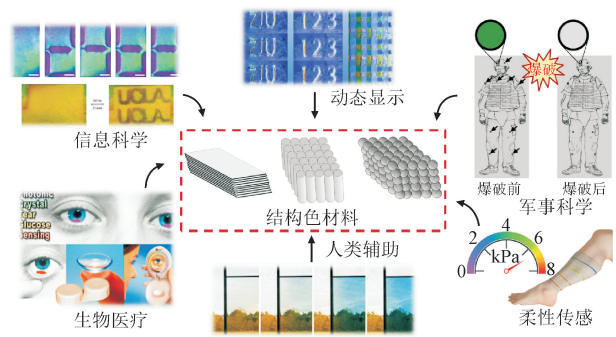


图 1 结构色及其载体材料的典型应用领域

Fig.1 Typical applying fields of structural color and its carrier materials

光子晶体(photonic crystals,PC)所具有的独特结构是自然界中结构色的产生原因。它一般是由两种或两种以上具有明显差异的电介质在纳米尺度下周期性排列形成的新型光学材料。按照电介质在空间的排列方式,可以将其分为一维光子晶体、二维光子晶体和三维光子晶体^[24-26]。光子晶体利用介电常数具有差异的电介质周期排列,产生对光的布拉格散射作用,称为“光子禁带”。类比具有“电子禁带”的半导体晶体材料,光子晶体可以对通过其中的光波进行调制,使得仅有部分频率的光可以在材料中传播,进而产生众多特有的光学现象。

在光子晶体的应用中,光学信号往往是随时间变化的,为了实现动态颜色变化和动态信息传递,需要通过对光子晶体参数的调整来达到改变材料中传播的光波频率(或光谱的带隙中心波长)的目的,即光子晶体的结构色调控。光子晶体的结构色取决于 3 个关键参数:相对折射率(介电常数)、晶格常数、入射角或观测角。它们三者与结构色的关系可以用 1913 年英国物理学家布拉格提出的 Bragg 方程^[12,27]描述如下

$$m\lambda = \sqrt{\frac{8}{3}}D(n_{\text{eff}}^2 - \cos^2\theta)^{1/2} \tag{1}$$

$$n_{\text{eff}}^2 = n_p^2V_p + n_m^2V_m \tag{2}$$

式中: m 为散射阶数; λ 为光谱的带隙中心波长; D 为晶格常数; n_{eff} 为组成光子晶体介质的平均折射率; θ 为布拉格掠射角(反映入射角和观测角); n_p 为介质 1 的折射率; n_m 为介质 2 的折射率; V_p 为介质 1 的体积分数; V_m 为介质 2 的体积分数。

对光子晶体进行结构色调控的方法围绕相对折射率(介电常数)、晶格常数、入射角或观测角等 3 个关键参数展开。按照光子晶体基体材料的变形能力,可将其分为刚性光子晶体和柔性光子晶体。刚性光子晶体的基体材料是金属或刚性非金属等形状

不易发生改变的材料,这类光子晶体晶格常数不易改变,主要通过调节材料平均折射率的方法对结构色进行调控。柔性光子晶体的基体材料一般是具有大变形能力的超弹性材料,它能够根据外界环境需要产生对应的形状变化。许多柔性可拉伸聚合物材料被用作柔性光子晶体的基体材料,例如聚苯乙烯 (polystyrene, PS)、聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 和聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS) 等。除了调节材料的平均折射率外,柔性光子晶体大多是通过调节晶格常数或晶格单元尺寸的方法对结构色进行调控。柔性光子晶体因其可拉伸、可弯曲的性能,在柔性智能穿戴、曲面显示、复杂外形装备的伪装等领域具有很好的应用前景。因此,近年来研究人员不断探索多种调节关键参数的方法,实现对光子晶体结构色的有效调控,这些手段主要包括:机械调节^[28-46]、磁场调节^[47-50]、光调节^[51-53]、电场调节^[18,54-67]、溶胀^[68-69]、温度调节^[70]和物理相变^[71-72]等。其中结构色的电场调节属于电致变色 (electrochromic, EC) 技术中的一类。由于电信号在生产生活中的普及,电致变色已成为结构色调控手段中最具应用前景的技术。因此,面向柔性光子晶体的电致变色技术是一个需要深入探索的重要研究领域。

1 电致结构变色技术研究现状

利用电场调节柔性光子晶体结构色的技术属于电致变色技术范畴。由于电信号具有便捷、高效、易

控等特点,使得电致变色成为最被关注的一种变色技术。电致变色指通过施加电信号对颜色进行可逆控制的技术^[73],它在智能窗、信息显示、电子纸、电子皮肤等领域具有广阔的应用前景^[74-75]。根据材料的变色机理,可以将其分为电致化学变色^[76-78]和电致结构变色^[18,54-67]两大类。相较于电致化学变色,电致结构变色具有化学稳定性好、不存在液体泄漏、不易褪色等特征,且可以在可见光范围内实现颜色的连续变化,因而具有很好的发展前景,其具体实现方式是通过电信号对决定光子晶体颜色的折射率(介电常数)、晶格常数、入射角或观测角等 3 个参数进行调节。Zhang 等将太阳能电池与光子晶体结合制备了多层结构,通过太阳能电池改变一维光子晶体层间的相对折射率对反射光谱进行颜色的调控^[57]。Walish 等制备了由聚苯乙烯 (PS) 和聚 2-乙烯基吡啶 (P2VP) 两种聚合物交替形成的层状一维光子晶体结构,通过电致溶胀改变层间距可实现对材料反射光谱的调节^[58]。Shim 等制备了电极-PS 纳米颗粒阵列-聚乙烯醇介电层-电极的 4 层结构,利用电场控制阵列中 PS 颗粒的分布来调节三维光子晶体的晶格常数,进而控制材料的颜色变化^[59]。Lee 等和 Shim 等分别研究了通过电场改变纳米颗粒在悬浊液中分布情况的方法,从而通过三维光子晶体晶格常数的改变对材料的反射光谱在可见光范围内进行调控^[60-61]。Weiss 等通过电场和温度相结合的方式改变多孔硅中液晶的折射率,从而对一维光子晶体的带隙波长进行改变^[62],以上研究成果如图 2 所示。

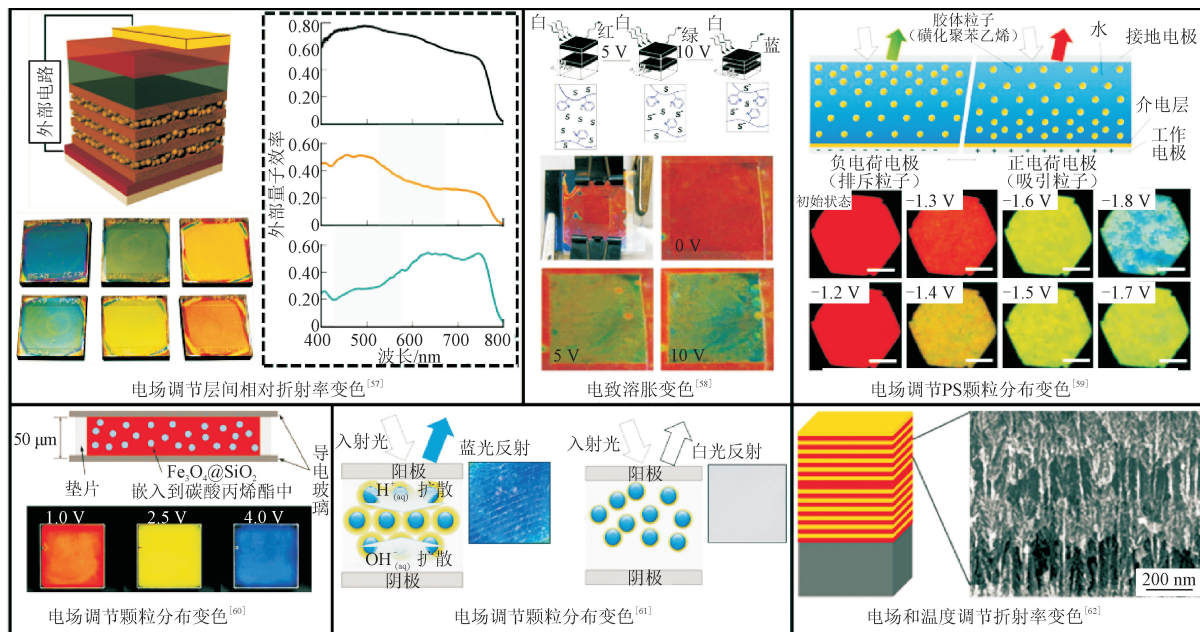


图 2 单一参数引起电致结构变色的原理及变色效果^[57-62]

Fig. 2 The principle and effect of electrochromism caused by single parameter^[57-62]

有研究通过电信号同时改变光子晶体两个或两个以上的参数,从而实现更大范围的颜色调节。Arsenault等^[54-55]使用 ITO(导电玻璃)电极通过电化学方法对内含单分散 SiO₂ 纳米颗粒的水凝胶光子晶体进行溶胀,通过调整晶格常数和折射率两个参数实现了大范围的颜色变化。Hwang 等通过施加电场改变共聚物凝胶光子晶体的体积来改变晶格常数和折射率,从而实现结构色调控^[56],以上研究如图 3 所示。

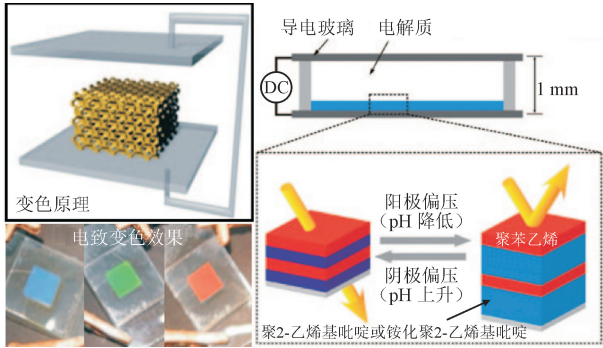


图 3 调节晶格常数及折射率引起变色^[54-56]
Fig. 3 Electrochromism caused by tuning lattice constant and refractive index^[54-56]

可以看出,在电致结构变色中,通过电压改变晶格常数及折射率进行结构色调节的技术大多不需要液态介质参与,没有电致化学变色中存在的泄露和密封问题,也不存在化学色稳定性问题,且可以在可见光范围内实现颜色的连续变化,因而电致结构变色比电致化学变色更具发展前景。从上面介绍可知,目前的电致结构变色研究中,大多是通过电场对柔性光子晶体内部的纳米颗粒分布进行控制从而实现颜色调控的,这种光子晶体内部微粒分布结构不够稳定,容易失效且变色范围不大。另外,此类电致结构变色技术的电极或衬板大多采用 ITO 玻璃或 PET 薄膜等材料,往往只能实现一定程度的弯曲变形,难以实现真正意义上的柔性,因此,需对电致结构变色技术进行进一步的探索。

2 电话性材料及其应用研究现状

电话性材料(electroactive materials, EM)是近年来被材料、机械、力学、仿生等学科普遍关注的一类智能材料,这类材料的共同特点是在电信号激励下能够产生较大的变形和力的输出,同时具有柔性好、响应快、能耗低、能量密度高等突出优点,近年来成为柔性驱动领域研究的一个热点,也有望成为电致结构变色领域一个具有发展前景的新技术。电话

性材料包括电场型电话性聚合物(如介电弹性体、电致伸缩介电凝胶等)、离子型电话性聚合物(如离子聚合物金属复合材料、离子凝胶等)、电热型材料(如形状记忆合金、形状记忆聚合物、捻卷型人工肌肉等)等,下面分别进行介绍。

2.1 电场型电话性聚合物材料及其应用

电场型电话性聚合物的工作原理是材料在电场的静电库仑力作用下产生大变形。在众多电场型电话性聚合物中,介电弹性体(dielectric elastomer, DE)材料是其中最具代表性的一种,它具有能量密度大、弹性模量小、输出变形大、成本低、制造简单等优点,成为近 20 年来被研究人员广泛关注的一类电话性材料^[79]。DE 材料为典型的三明治结构,如图 4 所示。它由一个介电材料层和与其紧密贴合的上下表面柔性电极组成,主要利用电场作用下电极之间的库仑力挤压,促使介电材料层产生厚度变薄和面内扩张的变形^[80]。图 5 所示为 DE 样品的实际通电变形效果,图 5 中灰色部分为柔性电极,可以看到通电后样品的面积显著增大,驱动器输出了较大范围的面内扩张。

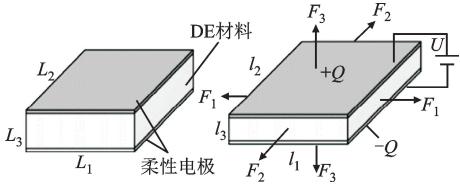


图 4 DE 材料结构及变形机理
Fig. 4 Internal structure and deformation mechanism of DE

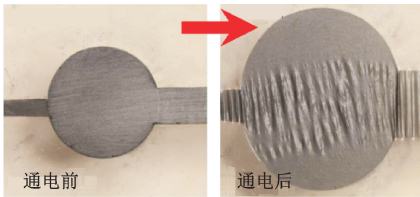


图 5 DE 材料变形效果
Fig. 5 The morphology of DE before and after electrification

DE 材料具有柔性好、大变形和快速响应的特点,这使得其在柔性驱动器研究领域脱颖而出。近年来,大量的研究工作聚焦于利用 DE 材料开发各种柔性驱动器。Nguyen 等通过将多个单层 DE 驱动器进行叠加,制成了一种具有线性输出能力的多层堆栈驱动器,并将其应用于仿生四足机器人的制作^[81]。随后,Nguyen 等又利用多相位 DE 驱动器的组合实现了一种多自由度摆动驱动器,利用该驱动器制作了仿生六足机器人^[82]。

Sun 等将 4 组纯剪切型 DE 串联制备了一种可折叠驱动器,通过电压调节不同组 DE 变形可以输出多种折叠形状,并利用该驱动器制备了一种轮式移动机器人^[83]。Li 等将 6 个最小能量结构 DE 串联形成了环形驱动器,当电压作用在其中一块 DE 时环形将变为椭圆环,引起驱动器滚动寻求新的平

衡^[84]。Henke 等设计了 6 组 DE 在平面内串联的结构,通过 6 组协调运动将 DE 的面内伸缩转化为其下部连接的 V 型腿的交替摆动,从而实现结构整体向前爬行^[85]。Li 等利用两组纯剪切型 DE 对称连接制成摆动型驱动器,并将其应用到柔性机翼的蒙皮结构中^[86],以上研究成果如图 6 所示。

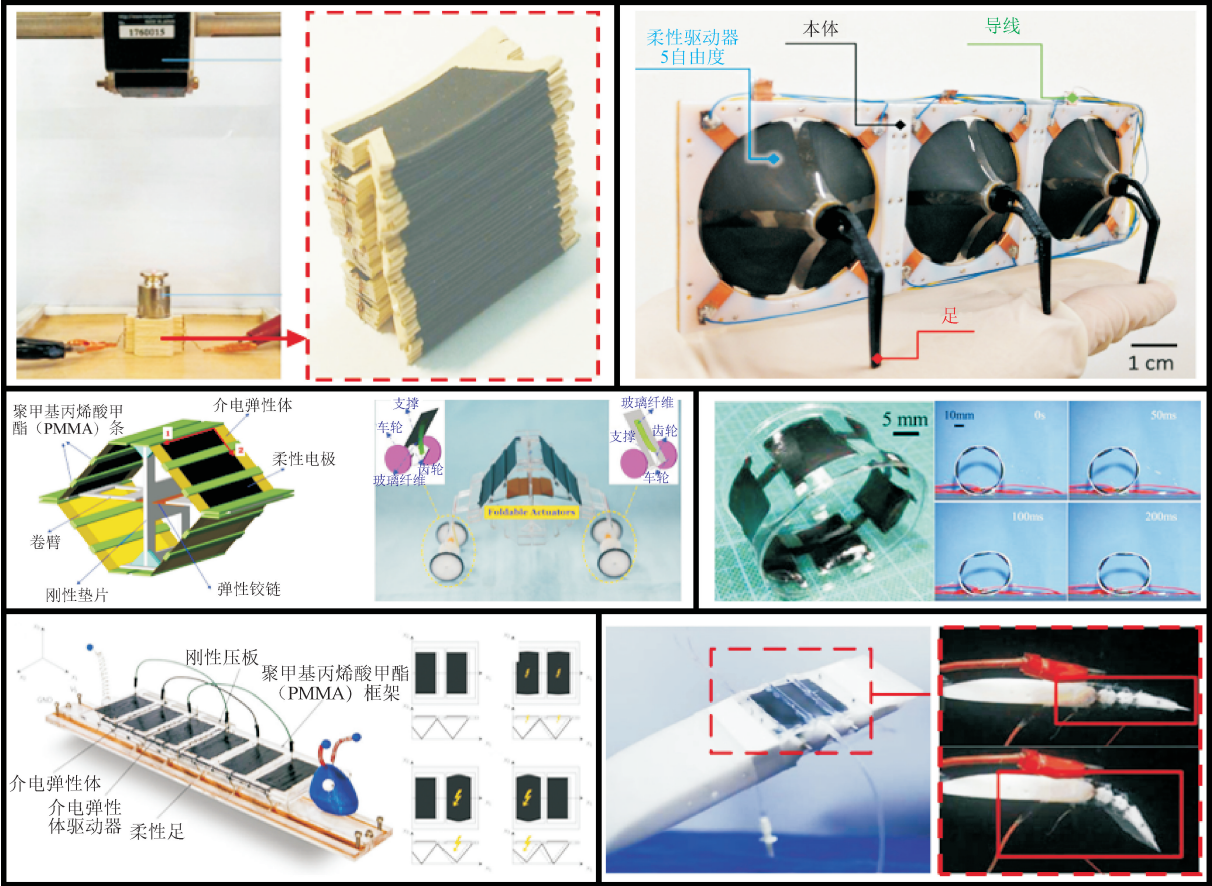


图 6 基于 DE 的各种驱动器及相关应用^[81-86]

Fig. 6 Actuators and related applications based on DE^[81-86]

总体来看,通过合理设计 DE 驱动器的结构可以实现多种运动模式,这种灵活的大变形驱动能力使得 DE 有望在柔性电致变色技术中得到应用。

2.2 离子型电活性聚合物材料及其应用

离子型电活性聚合物的工作原理是通过离子迁移等电化学过程将电能转化为动能输出。离子聚合物-金属复合材料(ionic polymer-metal composites, IPMC)是其中最具代表性的一种,它具有与生物组织相似的柔性特征,同时具备驱动电压低、无噪音、输出变形大、可随意裁剪等优势,近年来得到了学界广泛的关注^[87]。IPMC 是由离子聚合物及其表面两侧组装的金属电极构成,聚合物中的带电离子在表面电极电压作用下产生迁移,引起离子在一侧表

面附近堆积,导致材料产生弯曲变形,如图 7 所示。

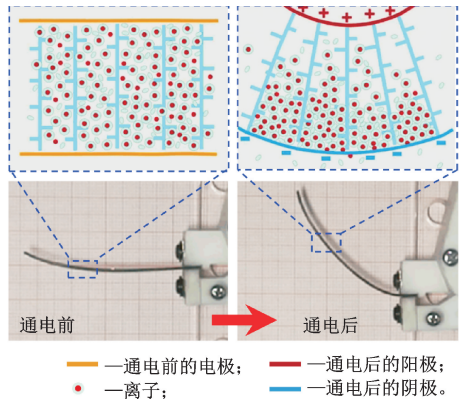


图 7 IPMC 结构及变形机理

Fig. 7 Internal structure and deformation mechanism of IPMC

IPMC 具有能耗低和输出弯曲变形大的特点,这使得其在许多致动器尤其是弯曲致动器的开发中得到了应用。由于 IPMC 可以被任意裁剪,因而常被用在一些特殊形状尺寸或微米级别的器件中^[88-93]。Chen 等利用 IPMC 设计制作了人造蝠鲼的仿胸鳍驱动器,实现了人造蝠鲼在水中的快速游动^[88],该人造蝠鲼可以在 15 s 内向前游动 200 mm 以上。Ye 等采用能输出较大弯曲变形的 IPMC 作为驱动器,制作了机器鱼的尾翼和侧翼^[89],通过 IPMC 的弯曲摆动频率可以控制机器鱼的游动速度,使其在 25 s 内可以向前游动约 120 mm。Feng 等通过 IPMC 弯曲变形特性设

计了一种灵活的医用电控手术夹,可以进行微创侵入性手术^[90]。Sideris 等利用 IPMC 在电压作用下的摆动特性设计制造了微流量泵,在低于 5 V 的电压下实现了 669 pL/s 的泵送量^[91]。He 等基于多孔 IPMC 制备了一种在空气中可以相对稳定工作的弯曲驱动器,并将其应用于柔性抓取器的设计^[92]。Shen 等利用相互对称的 12 片 IPMC 制备了仿乌贼运动的水下柔性驱动装置,通过各片 IPMC 的协同控制可以实现多种运动模式^[93]。唐刚强等利用 IPMC 开发了多种驱动器,实现了多种驱动模式和仿生形态(墨鱼、蝴蝶)^[94-96],上述成果如图 8 所示。

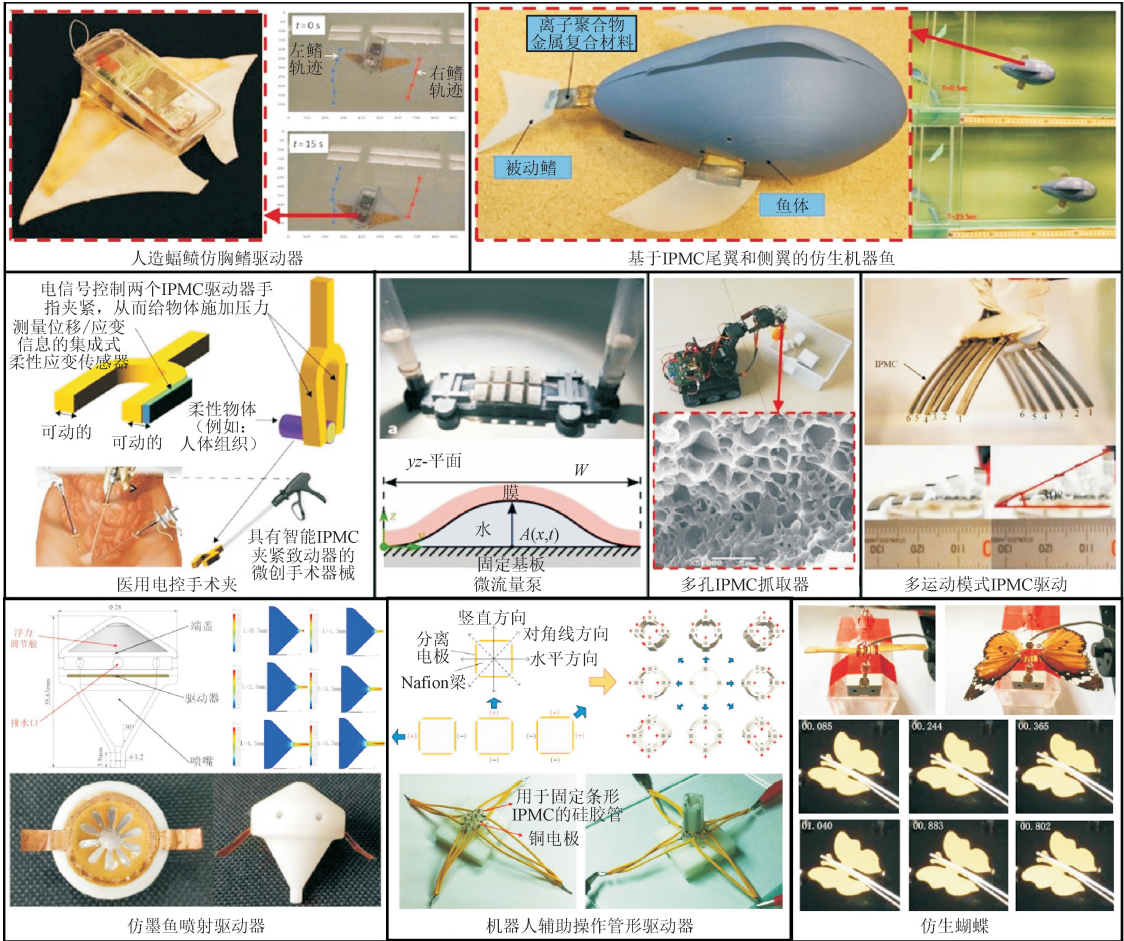


图 8 基于 IPMC 的各种驱动器及相关应用^[88-96]

Fig. 8 Actuators and related applications based on IPMC^[88-96]

总体来看,IPMC 驱动器主要适用于输出弯曲运动的工作场合。鉴于在 IPMC 的致动机理中,水分足够是保证离子迁移质量的前提,因而该材料更适于液体环境或与液体相接触的相关应用中。

2.3 电热型材料及其应用

由于电信号的便捷、高效、易控等特点,许多热敏变形材料在使用时都选择通过电能进行温度控

制。电热型材料是指以电信号为最初的输入信号,中间经历热能信号的转化最终输出力和变形的材料的总称,它经历的能量转变过程为电能—热能—动能。电热材料中以形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)的研究和应用最为广泛。

形状记忆合金是一种常见的形状记忆材料,其特点是能够“存储”之前的形态,并在外界电、热、光

等信号的激励下恢复到之前的形态。SMA 产生形状记忆行为的机理是其内部晶体奥氏体组织和马氏体组织之间的相互转变。奥氏体组织在高温下是稳定的,马氏体组织在低温下是稳定的,温度是诱发组织转化的条件。SMA 的相变过程如图 9 所示,当 SMA 受热时它开始从马氏体转变为奥氏体相。奥氏体转变温度(A_s)是这种转变开始的温度,奥氏体转变结束温度(A_f)是这种转变完成的温度。当 SMA 受热超过转变温度时,它就开始收缩并转变为奥氏体结构,从而恢复到原来的形态。在冷却过程中,相变在马氏体转变温度(M_s)开始恢复到马氏体,并在达到马氏体转变结束温度(M_f)时完成^[97-98]。电信号驱动的 SMA 是一种典型的电话性材料,它是通过电信号产生热量使材料温度升高至相变温度以上,进而产生形状改变的一种驱动方式。

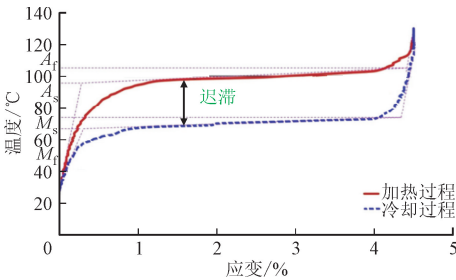


图 9 形状记忆合金记忆效应的相变过程^[98]

Fig. 9 Phase transformation process of SMA memory effect^[98]

电话性 SMA 具有驱动电压低、轻质化、输出驱动力大等特点,这些特有性质使其在航空航天、能源工业、生物医学等领域的某些应用中具有得天独厚的优势。近年来,大量的研究工作聚焦于利用 SMA 开发各种柔性驱动器。Lee 等利用 SMA 开发了一种直径仅为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的微型驱动器,报道称该驱动器的功能参数与肌肉纤维非常接近,是一种理想的人造肌肉纤维材料^[99]。Rodrigue 等利用 SMA 和 PDMS 开发了一种形状记忆合金聚合物驱动器,并利用该驱动器制成了仿人手部和腕部的器件^[100],该器件可以灵活地实现腕部转动和手指的弯曲。Granberry 等使用 Ni-Ti SMA 制作了编织驱动器,将其与衣物纤维编织为一体,可以实现随温度进行衣物形状和尺寸的调节,以适应每位穿戴者的身体要求^[101]。Youn 等开发了一种基于 SMA 的分段可调镜头,利用电话性 SMA 驱动器灵活调节光圈实现镜头对焦^[102]。Park 等利用 SMA 和织物组合设计了一种穿戴型驱动器,可以在温度的激励下输出较大的力(120 N)和变形(应变 50%),使普通穿戴衣物具有了辅助驱动的特性^[103]。Kang 等将 SMA 与形状记忆聚合物(SMP)相结合制备了一种形状记忆复合材料驱动器,通过 SMA 和 SMP 的交替控制可实现驱动器的往复运动^[104],以上成果如图 10 所示。

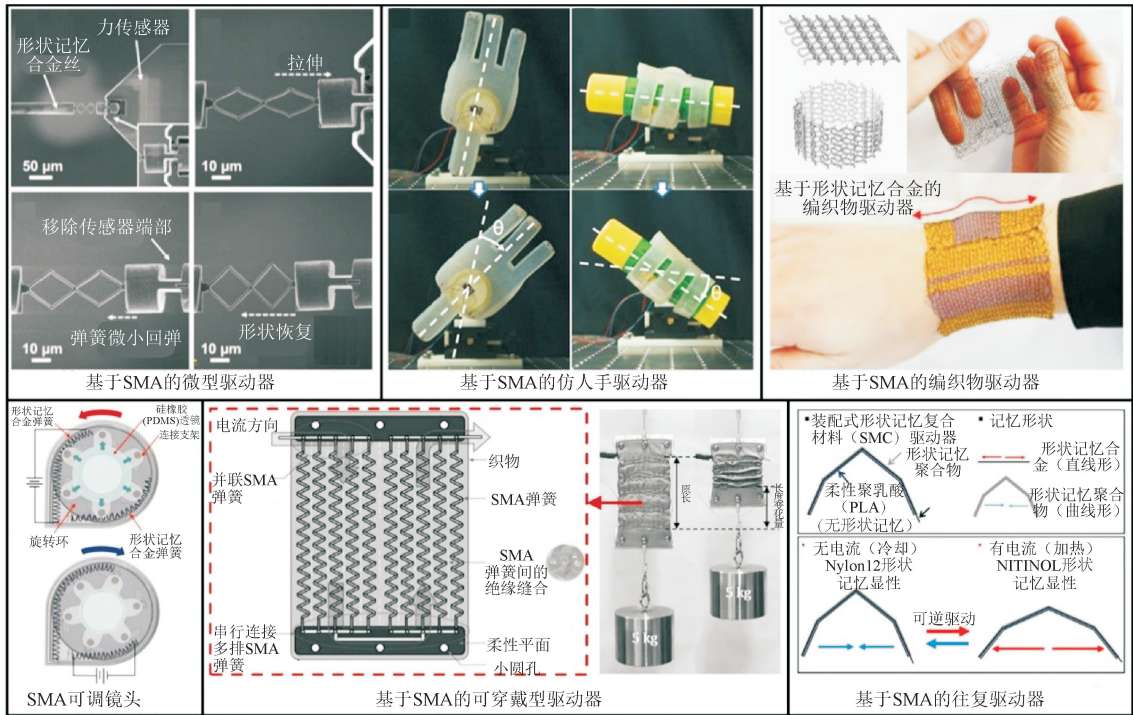


图 10 基于 SMA 的各种驱动器及应用^[99-104]

Fig. 10 Actuators and related applications based on SMA^[99-104]

在电热型材料中,还有一类新兴的捻卷型人工肌肉(twisted and coiled polymer actuators, TCA)近年来受到研究人员的广泛关注,被认为是一种很有研究和应用前景的仿生人工肌肉^[105]。TCA 结构是由一根热敏聚合物纤维和一根导热性能良好的纤维扭曲缠绕后形成的,其驱动机理是在热量或电信号的激励下使纤维温度迅速升高,其弹簧状螺旋结构在温度升高到一定程度时产生解旋,进而在其长度方向产生收缩变形,其原因是形成 TCA 的聚合物纤维具有负的热膨胀系数,在高温下纤维发生收缩,使得原本处于扭转状态且具有螺旋结构的纤维在截面处产生解旋,而纤维截面处的解旋直接导致整个人工肌肉螺旋线圈产生收缩。

经过合理设计,TCA 在外部温度或电信号的刺激下可以产生较大的收缩、弯曲、扭转等变形,同时产生较大的输出力,是一种在柔性驱动、微型机器人和运动辅助等领域具有潜在价值的驱动器。Haines 等证明了将具有低成本和高强度特征的聚合物纤维进行扭曲缠绕处理,可以制成具有较大的力和变形输出能力的人工肌肉驱动器^[105]。Wu 等受肌肉骨

骼系统的启发,利用 TCA 开发了一种电致柔性多自由度弯曲驱动器,它可以在 220 mA 的输入电流下产生 1.69 MPa 的压力和 53% 的应变^[106]。Kim 等基于尼龙和氨纶制备了输出应变达到 45% 的 TCA 驱动器,并利用该驱动器设计制作了仿生手臂^[107]。Tang 等利用 3 个 TCA 等间距排布制备了一种可以在空间内向任意方向弯曲的柔性驱动器,并基于该驱动器制备得到了两手指的柔性抓手,在电压作用下实现了重物抓取^[108]。同时,Tang 等又利用 TCA 和硅橡胶开发了柔性弯曲驱动器,并基于该驱动器制作了软体爬行机器人^[109],该机器人可以在 5 V 电压作用下达到 1.2 mm/s 的速度。以上研究成果如图 11 所示。

总体来看,相对于电场型和离子型驱动器,电热型材料响应速度较慢,但其结构设计灵活、输出变形形式多样、输出力大等特点也使得其在相关应用中具有不可替代的优势。在利用电活性材料进行器件设计时,应根据具体任务需求和边界条件选择最适合的电活性材料,才能充分发挥各自的特点。各类电活性材料的性能特点见表 1^[110]。

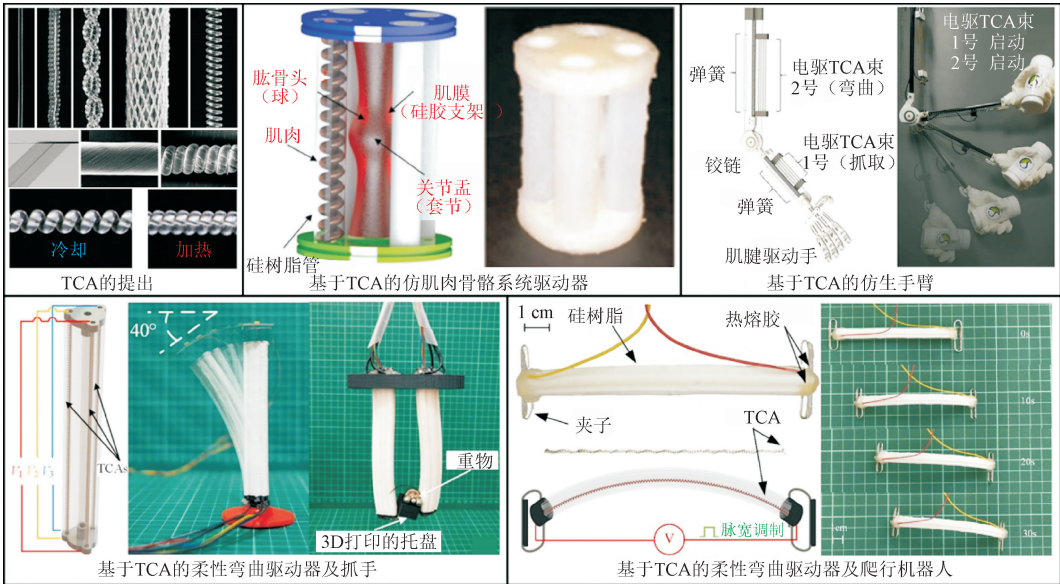


图 11 基于 TCA 的各种驱动器及应用^[105-109]

Fig. 11 Actuators and related applications based on TCA^[105-109]

表 1 典型电活性材料的主要性能参数比较^[110]

Table 1 Comparison of main performance parameters of typical electroactive materials^[110]

材料类型	变形形式	驱动电压/V	响应时间量级	变形速度/(mm·s) ⁻¹	能耗量级	最大应变/%
DE	伸缩	2 000~10 000	ms	4.00	mW	>100
IPMC	弯曲	1~5	μs~ms	0.16	mW	>8
SMA	伸缩/弯曲	1~10	s~min	2.20	W	6~50
TCA	伸缩	1~5	s~min	1.20	W	<50

3 电活性材料驱动的结构色调控技术研究现状

在电致变色技术中,驱动电压、变色范围、等效弹性模量等都是非常关键的性能指标。研究者希望可以用尽可能低的驱动电压产生尽可能大的

变色范围,同时希望电致变色器件具有尽可能好的柔性,即更低的等效弹性模量,以利于电致变形。

依据上述考量指标,将已有研究中具有代表性电致变色技术的性能参数进行综合比较,各代表性研究结果的具体参数见表 2。

表 2 典型电致变色研究中的主要参数对比
Table 2 Comparison of main parameters in typical research of electrochromism

文献	波长变化值 $\Delta\lambda/\text{nm}$	杨氏模量 E/MPa	驱动方法	驱动电压/V	代表符号
[54]	约 110.0	约 60 000.00	电致溶胀	3.0	★
[55]	约 235.0	约 60 000.00	电致溶胀	2.8	◀
[56]	约 84.0	约 56 000.00	凝胶电化学变形	5.0	▲
[57]	约 120.0	约 160 000.00	电化学反应改变折射率	1.0	⬢
[58]	约 112.0	约 56 000.00	电致溶胀	5.0	◆
[59]	约 100.0	约 56 000.00	电压控制纳米粒子分布	1.80	▶
[60]	约 165.0	约 60 000.00	电压控制纳米粒子分布	4.0	■
[61]	约 150.0	约 60 000.00	电压控制纳米粒子分布	3.2	▼
[62]	约 3.3.0	约 60 000.00	电压促使介质相变	140.0	●
[63]	约 150.0	约 1.80	DE	3 000.0	○
[64]	约 130.0	约 2.00	DE	4 000.0	△
[65]	约 225.0	约 2.00	DE	9 000.0	☆
[66]	约 60.0	约 2.00	DE	10 000.0	◇
[67]	约 25.0	约 1.27	水凝胶	3 000.0	□

为了直观比较,将表 2 中的数据绘制成如图 12 所示的对比图,图 12 中两个水平坐标分别反映器件的等效杨氏模量 E 和变色范围的带隙中心波长变化值 $\Delta\lambda$ 。可见,图 12 中各项研究的性能主要分布在左上和右下两个区域内,在左上区域内的研究中,Yin 等、Park 等、Kim 等、Baumberg 等、Foulger 等分别利用各种电活性材料驱动电致变色过程,这些研究中器件整体的等效杨氏模量较低(柔性较好),但驱动电压较高(1~10 kV)。在右下区域内的研究中,Arsenault 等、Hwang 等、Zhang 等、Walish 等、Yang 等、Lee 等、Shim 等、Weiss 等通过各种手段,利用电压改变光子晶体的平均折射率(介电常数)或晶格常数以实现电致变色,这些研究中器件整体的驱动电压较低(小于1 kV),但由于均采用了玻璃基板和 ITO 电极,导致等效杨氏模量较大(柔性较差)。

通过对比发现,已有研究中具有较大杨氏模量

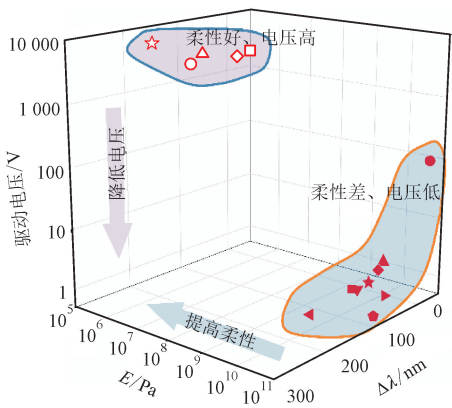


图 12 典型电致变色技术的性能对比
Fig. 12 Comparison on main performance of typical electrochromic techniques

(较硬)的电致变色器件所需驱动电压较低,但其变形能力较差;而具有较小杨氏模量(较软)的电致变色器件虽具有较好的变形能力,可满足特殊形状和

结构的要求,但通常变色所需驱动电压较高(1~10 kV)。实际应用时,应根据具体使用要求,选择适当的电致变色技术。另外,有必要对电致变色技术进行深入探究,开发出能兼顾柔性好、低驱动电压和大变色范围的电致变色器件,从而拓宽此类器件和技术的应用范围。

近年来,研究人员对电活性材料驱动的电致变色技术展开了探索研究^[111]。Wang 等利用离子型电活性聚合物进行了电致化学变色的研究,通过制备 Nafion 和银纳米线(AgNWs)复合材料实现了电-热-化学变色^[112]。在结构变色中,Yin 等在 VHB 4905 膜表面自组装了单分散 PS 纳米颗粒二维柔性光子晶体,并使用导电凝胶作为电极,在方形聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA 框架内制备了 DE 驱动器^[63],由于电压作用 DE 在 PMMA 框架内部产生面内扩张变形,导致其上的柔性光子晶体的晶格常数增大,引起结构色大范围红移(向红色一侧移动)。同时,通过改变光线入射角使颜色变化扩展到整个可见光范围。Chang 等喷涂银纳米线(AgNWs)做电极在圆形 PMMA 框架内制成了 DE 驱动器,用于调节以 PDMS 和单分散 PS 纳米颗粒制成的三维柔性光子晶体的反射光谱^[64]。Kim 等利用柔性碳电极制备圆形 DE 驱动器,通过电压作用调整内含单分散 PS

纳米颗粒的水凝胶光子晶体中颗粒的间距,实现了可见光范围内的颜色变化,并将颜色变化与驱动器薄膜振动进行了关联^[65]。Zhao 等以水为电极材料制备 DE 驱动器,在电压作用下对以弹性聚合物为基体的蛋白石结构光子晶体进行颜色调节^[66]。Xia 等在内含单分散 PS 纳米颗粒的水凝胶两侧施加电场,通过施加电场改变颗粒间距以调节晶格常数,进而产生可见光范围内的颜色变化^[67]。Xie 等利用形状记忆聚合物(shape memory polymer,SMP)制备了一种双稳态电活性聚合物,并在其中嵌入纳米颗粒形成光子晶体,在通过电场改变光子晶体晶格常数进而调控结构色的同时,可以通过聚合物的双稳态特性很好地实现颜色固定^[18],以上研究成果如图 13 所示。

可以看出,电活性材料驱动的电致结构变色的技术具有许多独特的优势:其一,器件材料为纯固态,易于封装;其二,电活性材料在电信号激励下可以产生丰富的响应模式,为电致变色器件的设计提供了便利;其三,电活性材料大多具有良好的柔性和生物相容性,可以为柔性电致变色的发展及其应用提供条件。近年来,此类技术越来越受到相关领域研究人员的关注。现有电活性材料驱动的电致变色技术的典型研究进展的主要参数见表 3。

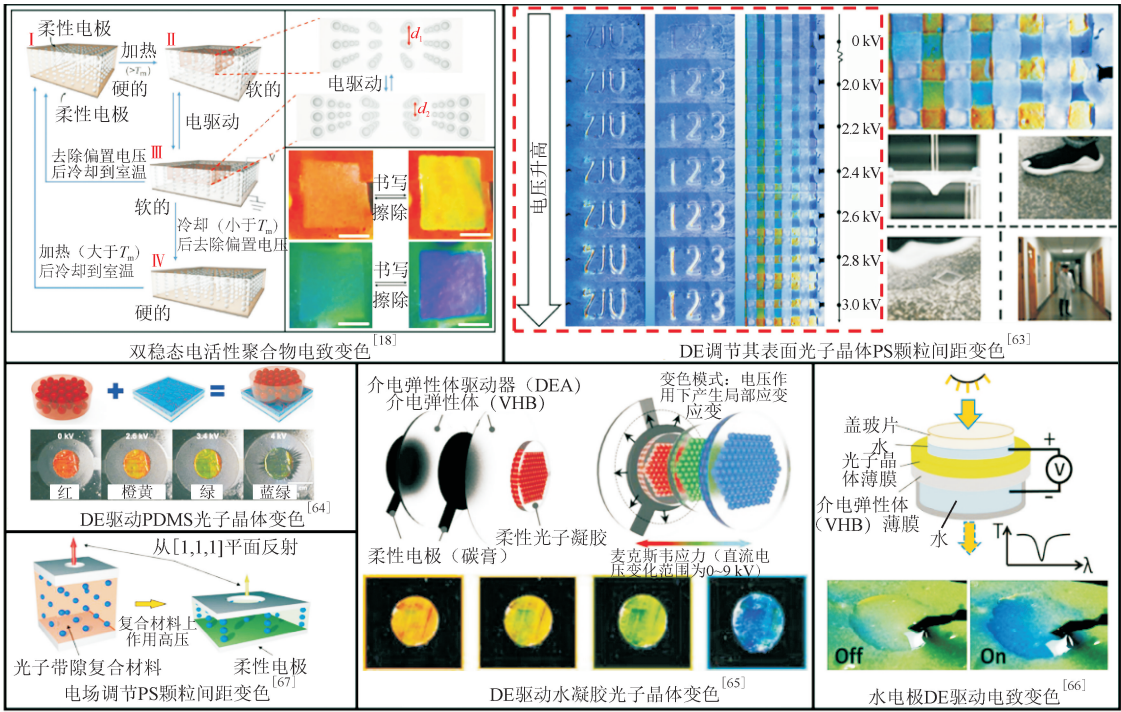
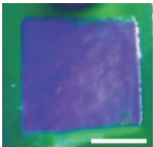
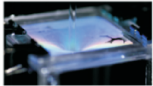
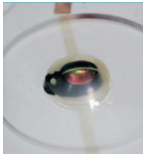
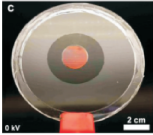
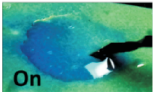
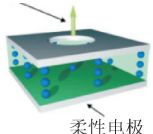


图 13 电活性材料驱动的电致变色技术研究^[18,63-67]
Fig. 13 Research on electrochromism actuated via electroactive materials^[18,63-67]

表 3 典型电活性材料驱动的结构色调控技术研究
Table 3 Representative research on electrochromism actuated via electroactive materials

文献	电活性材料类型	光子晶体类型	波长变化值 $\Delta\lambda/\text{nm}$	变色器件
[18]	电活性形状记忆聚合物	$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{C}$ 颗粒三维分布	87	
[63]	DE	PS 纳米颗粒二维分布	150	
[64]	DE	PS 纳米颗粒三维分布	150	
[65]	DE	PS 纳米颗粒三维分布	150	
[66]	DE	PS 核壳结构 纳米颗粒三维分布	60	
[67]	电活性水凝胶	PS 纳米颗粒三维分布	60	

总体来看,当前电活性材料驱动的结构变色研究尚处于起步阶段,研究中使用的电活性材料主要集中在 DE 驱动器和其他少量电活性聚合物,且变色范围有待提高,因此,利用多种电活性材料的优异性能,开发综合性能更优的电致变色器件迫在眉睫。

4 结论与展望

在柔性光子晶体的颜色调控技术中,电调控技术具有便捷、快速的突出优势,因而最具发展潜力,其中,基于电活性材料驱动的柔性光子晶体可开发出柔性好、响应快、能耗低、能量密度高、易于封装、变色性能稳定的电致变色器件,可拓宽电致变色技术的应用领域,提高其实际应用价值。从目前的研究现状来看,该领域的研究至少存在以下亟待解决的问题与挑战。

(1)在电致变色技术中,柔性光子晶体在外界激励下可产生拉伸变形,引起纳米结构变化进而产生结构色变化。已有柔性光子晶体的研究或者存在变色范围较小的问题,或者存在实现大变色范围所需的应变较大的问题,也就是说难以兼顾变色范围大

与应变小的性能要求,从而大大限制了柔性光子晶体的应用范围。另外,在多次循环变色过程中,柔性光子晶体的变色性能可能会因为表面的纳米结构在外界冲击作用下发生损坏而造成结构色消失,而现阶段关于柔性光子晶体循环变色稳定性及表面抗冲击性的问题鲜有研究。

(2)对于柔性光子晶体来讲,纳米结构类型和尺寸、所选基体材料类型、制备工艺参数等都会对柔性光子晶体的变色性能产生影响,不同目标的器件对柔性光子晶体变色性能的要求也不尽相同,因此应根据实际变色需要进行结构和工艺参数的优化设计。现有柔性光子晶体的结构与制备工艺参数几乎全是基于经验的选取,重点是追求能够实现光子晶体的变色功能,而综合考虑柔性光子晶体的性能指标,对其结构和工艺参数进行优化的研究几乎是空白的,从而导致人们难以根据实际应用需求,设计出性能优良的柔性变色器件。

(3)柔性电致变色器件在生物医疗、柔性显示与传感领域具有潜在的应用价值,这对器件的柔性、变色范围、响应时间、安全性等提出了多样化的要求。

鉴于现有电致变色器件研究时间短,或者存在部分器件变色范围只能包含几种典型颜色或覆盖部分可见光范围,难以实现整个可见光范围内颜色连续变化;或者存在部分器件驱动电压过高,难以满足实际应用场合的安全性要求;或者存在部分器件或衬底材料为刚性,难以实现真正的柔性等。因此迫切需要开发出可以兼顾柔性好、变色范围大和低驱动电压的柔性电致变色器件,或者是开发出具有不同性能以满足不同需求的电致变色器件。

针对上述几个方面的问题展开深入研究,将有利于丰富基于电活性材料的柔性电致变色技术,提高对变色材料及技术的系统性认识,为推动柔性电致变色技术和多功能柔性驱动器的发展及应用奠定基础。

参考文献:

- [1] LI Ling, KOLLE S, WEAVER J C, et al. A highly conspicuous mineralized composite photonic architecture in the translucent shell of the blue-rayed limpet [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6322.
- [2] CHEN Guojian, HONG Wei. Mechanochromism of structural-colored materials [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(19): 2000984.
- [3] MARLOW F, MULDERISNUR, SHARIFI P, et al. Opals: status and prospects [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2009, 48(34): 6212-6233.
- [4] PARKER A R, WELCH V L, DRIVER D, et al. Structural colour: opal analogue discovered in a weevil [J]. *Nature*, 2003, 426(6968): 786-787.
- [5] SHARMA V, CRNE M, PARK J O, et al. Structural origin of circularly polarized iridescence in jeweled beetles [J]. *Science*, 2009, 325(5939): 449-451.
- [6] GUR D, PALMER B A, LESHEM B, et al. The mechanism of color change in the neon tetra fish: a light-induced tunable photonic crystal array [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(42): 12426-12430.
- [7] ZI Jian, YU Xindi, LI Yizhou, et al. Coloration strategies in peacock feathers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(22): 12576-12578.
- [8] TEYSSIER J, SAENKO S V, VAN DER MAREL D, et al. Photonic crystals cause active colour change in chameleons [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6368.
- [9] VATANKHAH-VARNOSFADERANI M, KEITH A

- N, CONG Yidan, et al. Chameleon-like elastomers with molecularly encoded strain-adaptive stiffening and coloration [J]. *Science*, 2018, 359(6383): 1509-1513.
- [10] CHEN Zhuoyue, FU Fanfan, YU Yunru, et al. Cardiomyocytes-actuated morpho butterfly wings [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(8): 1805431.
- [11] NIU Shichao, LI Bo, MU Zhengzhi, et al. Excellent structure-based multifunction of morpho butterfly wings: a review [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2015, 12(2): 170-189.
- [12] ZHAO Yuanjin, XIE Zhuoying, GU Hongcheng, et al. Bio-inspired variable structural color materials [J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41(8): 3297-3317.
- [13] 俞洁, 慈明珠, 鲁泉玲, 等. TiO_2 反蛋白石光子晶体最新研究进展 [J]. *影像科学与光化学*, 2018, 36(1): 14-32.
- YU Jie, CI Mingzhu, LU Quanling, et al. The latest research progress of TiO_2 inverse opal photonic crystal [J]. *Imaging Science and Photochemistry*, 2018, 36(1): 14-32.
- [14] 韩国志, 孙立国. 反蛋白石光子晶体的研究进展 [J]. *化学通报*, 2009, 72(4): 307-312.
- HAN Guozhi, SUN Ligu. Advance in inverse opal photonic structure [J]. *Chemistry*, 2009, 72(4): 307-312.
- [15] 王振领, 林君. 蛋白石及反蛋白石结构光子晶体 [J]. *化学通报*, 2004, 67(12): 876-882.
- WANG Zhenling, LIN Jun. Opal and inverse opal photonic crystals [J]. *Chemistry*, 2004, 67(12): 876-882.
- [16] VON FREYMAN G, KITAEV V, LOTSCH B V, et al. Bottom-up assembly of photonic crystals [J]. *Chemical Society Reviews*, 2013, 42(7): 2528-2554.
- [17] 寇东辉, 马威, 张淑芬, 等. 一维光子晶体结构色材料的应用研究进展 [J]. *化工进展*, 2018, 37(4): 1468-1479.
- KOU Donghui, MA Wei, ZHANG Shufen, et al. Research progress on applications of one-dimensional photonic crystal materials with structural colors [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(4): 1468-1479.
- [18] XIE Yu, MENG Yuan, WANG Wenxin, et al. Bistable and reconfigurable photonic crystals: electroactive shape memory polymer nanocomposite for ink-free rewritable paper [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(34): 1802430.

- [19] ALEXEEV V L, DAS S, FINEGOLD D N, et al. Photonic crystal glucose-sensing material for noninvasive monitoring of glucose in tear fluid [J]. *Clinical Chemistry*, 2004, 50(12): 2353-2360.
- [20] YIN Tenghao, WU Tonghao, ZHONG Danming, et al. Soft display using photonic crystals on dielectric elastomers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(29): 24758-24766.
- [21] CULLEN D K, XU Yongan, RENEER D V, et al. Color changing photonic crystals detect blast exposure [J]. *NeuroImage*, 2011, 54(S1): S37-S44.
- [22] SANDT J D, MOUDIO M, CLARK J K, et al. Stretchable optomechanical fiber sensors for pressure determination in compressive medical textiles [J]. *Advanced Healthcare Materials*, 2018, 7(15): 1800293.
- [23] BAETENS R, JELLE B P, GUSTAVSEN A. Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: a state-of-the-art review [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(2): 87-105.
- [24] 温熙森. 光子/声子晶体理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [25] 马锡英. 光子晶体原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [26] 张克勤, 袁伟, 张骛. 光子晶体的结构色 [J]. *功能材料信息*, 2010(Z1): 39-44.
ZHANG Keqin, YUAN Wei, ZHANG Ao. Structural color of photonic crystals [J]. *Functional Materials Information*, 2010(Z1): 39-44.
- [27] FUDOUZI H. Fabricating high-quality opal films with uniform structure over a large area [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 275(1): 277-283.
- [28] KOLLE M, LETHBRIDGE A, KREYSING M, et al. Bio-inspired band-gap tunable elastic optical multilayer fibers [J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(15): 2239-2245.
- [29] HAQUE M A, KAMITA G, KUOKAWA T, et al. Unidirectional alignment of lamellar bilayer in hydrogel: one-dimensional swelling, anisotropic modulus, and stress/strain tunable structural color [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(45): 5110-5114.
- [30] YUE Youfeng, KUOKAWA T, HAQUE M A, et al. Mechano-actuated ultrafast full-colour switching in layered photonic hydrogels [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4659.
- [31] LIU Longju, KHAN H A, LI Jingjing, et al. A strain-tunable nanoimprint lithography for linear variable photonic crystal filters [J]. *Nanotechnology*, 2016, 27(29): 295301.
- [32] ZHAO Pengfei, LI Bo, TANG Zhenhua, et al. Stretchable photonic crystals with periodic cylinder shaped air holes for improving mechanochromic performance [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(7): 075037.
- [33] 李墨馨, 王丹燕, 张诚. 超构表面结构色的原理及应用 [J]. *中国光学*, 2021, 14(4): 900-926.
LI Moxin, WANG Danyan, ZHANG Cheng. Meta-surface-based structural color: fundamentals and applications [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(4): 900-926.
- [34] ITO T, KATSURA C, SUGIMOTO H, et al. Strain-responsive structural colored elastomers by fixing colloidal crystal assembly [J]. *Langmuir*, 2013, 29(45): 13951-13957.
- [35] ZHAO Pengfei, XU Bo, ZHANG Yakun, et al. Study on the twisted and coiled polymer actuator with strain Self-Sensing ability [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(13): 15716-15725.
- [36] ZHAO Pengfei, CAI Yong, LIU Chen, et al. Study on the bio-inspired electrochromic device enabled via dielectric elastomer actuator [J]. *Optical Materials*, 2021, 111: 110569.
- [37] LEE G H, CHOI T M, KIM B, et al. Chameleon-inspired mechanochromic photonic films composed of non-close-packed colloidal arrays [J]. *ACS Nano*, 2017, 11(11): 11350-11357.
- [38] SCHÄFER C G, GALLEI M, ZAHN J T, et al. Reversible light-, thermo-, and mechano-responsive elastomeric polymer opal films [J]. *Chemistry of Materials*, 2013, 25(11): 2309-2318.
- [39] LIU Cihui, DING Haibo, WU Ziqian, et al. Tunable structural color surfaces with visually self-reporting wettability [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(43): 7937-7942.
- [40] 董晓彬, 周天丰, 贺裕鹏, 等. 微纳结构飞切加工与表面结构色调控 [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(19): 239-245.
DONG Xiaobin, ZHOU Tianfeng, HE Yupeng, et al. Research on micro-nano structure machining and property manipulation of the structural color surface [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(19): 239-245.
- [41] FUDOUZI H, SAWADA T. Photonic rubber sheets with tunable color by elastic deformation [J]. *Langmuir*, 2006, 22(3): 1365-1368.

- [42] VIEL B, RUHL T, HELLMANN G P. Reversible deformation of opal elastomers [J]. *Chemistry of Materials*, 2007, 19(23): 5673-5679.
- [43] ZHAO Pengfei, CHEN Hualing, LI Bo, et al. Stretchable electrochromic devices enabled via shape memory alloy composites (SMAC) for dynamic camouflage [J]. *Optical Materials*, 2019, 94: 378-386.
- [44] FINLAYSON C E, SPAHN P, SNOSWELL D R E, et al. 3D bulk ordering in macroscopic solid opaline films by edge-induced rotational shearing [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(13): 1540-1544.
- [45] JIANG Peng, BERTONE J F, COLVIN V L. A lost-wax approach to monodisperse colloids and their crystals [J]. *Science*, 2001, 291(5503): 453-457.
- [46] CHERNOW V F, ALAEIAN H, DIONNE J A, et al. Polymer lattices as mechanically tunable 3-dimensional photonic crystals operating in the infrared [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(10): 101905.
- [47] ZHU Cun, XU Wenyu, CHEN Liangshui, et al. Magnetochromatic microcapsule arrays for displays [J]. *Advanced Functional Materials*, 2011, 21(11): 2043-2048.
- [48] 杜宏艳, 戚宇帆, 吴晨雪, 等. SiO₂ 光子晶体结构色薄膜的制备与光学性能研究 [J]. *材料工程*, 2019, 47(12): 111-117.
- DU Hongyan, QI Yufan, WU Chenxue, et al. Preparation and optical properties of SiO₂ photonic crystal structure color films [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(12): 111-117.
- [49] XUAN Ruyang, GE Jianping. Photonic printing through the orientational tuning of photonic structures and its application to anticounterfeiting labels [J]. *Langmuir*, 2011, 27(9): 5694-5699.
- [50] LEE H, KIM J, KIM H, et al. Colour-barcode magnetic microparticles for multiplexed bioassays [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(9): 745-749.
- [51] GU Zhongze, FUJISHIMA A, SATO O. Photochemically tunable colloidal crystals [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2000, 122(49): 12387-12388.
- [52] KAMENJICKI MAURER M, LEDNEV I K, ASHER S A. Photoswitchable spirobenzopyran-based photochemically controlled photonic crystals [J]. *Advanced Functional Materials*, 2005, 15(9): 1401-1406.
- [53] 乔宇, 张峰, 孟子晖, 等. 温敏光子晶体结构色调控 [J]. *兵工学报*, 2020, 41(8): 1573-1580.
- QIAO Yu, ZHANG Feng, MENG Zihui, et al. Adjustment and control of structural color of thermochromic photonic crystal material [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(8): 1573-1580.
- [54] ARSENAULT A C, PUZZO D P, MANNERS I, et al. Photonic-crystal full-colour displays [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(8): 468-472.
- [55] PUZZO D P, ARSENAULT A C, MANNERS I, et al. Electroactive inverse opal: a single material for all colors [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2009, 48(5): 943-947.
- [56] HWANG K, KWAK D, KANG C, et al. Electrically tunable hysteretic photonic gels for nonvolatile display pixels [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(28): 6311-6314.
- [57] ZHANG Wei, ANAYA M, LOZANO G, et al. Highly efficient perovskite solar cells with tunable structural color [J]. *Nano Letters*, 2015, 15(3): 1698-1702.
- [58] WALISH J J, KANG Y, MICKIEWICZ R A, et al. Bioinspired electrochemically tunable block copolymer full color pixels [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(30): 3078-3081.
- [59] SHIM T S, KIM S H, SIM J Y, et al. Dynamic modulation of photonic bandgaps in crystalline colloidal arrays under electric field [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(40): 4494-4498.
- [60] LEE I, KIM D, KAL J, et al. Quasi-amorphous colloidal structures for electrically tunable full-color photonic pixels with angle-independency [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(44): 4973-4977.
- [61] SHIM H S, GYUN SHIN C, HEO C J, et al. Stability enhancement of an electrically tunable colloidal photonic crystal using modified electrodes with a large electrochemical potential window [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(5): 051104.
- [62] WEISS S M, OUYANG Huimin, ZHANG Jidong, et al. Electrical and thermal modulation of silicon photonic bandgap microcavities containing liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2005, 13(4): 1090-1097.
- [63] YIN Tenghao, WU Tonghao, ZHONG Danming, et al. Soft display using photonic crystals on dielectric elastomers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(29): 24758-24766.
- [64] CHANG H K, PARK J. Flexible all-solid-state electrically tunable photonic crystals [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(23): 1800792.
- [65] KIM D Y, CHOI S, CHO H, et al. Electroactive soft photonic devices for the synesthetic perception of color

- and sound [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(2): 1804080.
- [66] ZHAO Qibin, HAINES A, SNOSWELL D, et al. Electric-field-tuned color in photonic crystal elastomers [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(10): 101902.
- [67] XIA Jiqiang, YING Yurong, FOULGER S H. Electric-field-induced rejection-wavelength tuning of photonic-bandgap composites [J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(20): 2463-2467.
- [68] WANG Zhanhua, ZHANG Junhu, XIE Jing, et al. Bioinspired water-vapor-responsive organic/inorganic hybrid one-dimensional photonic crystals with tunable full-color stop band [J]. *Advanced Functional Materials*, 2010, 20(21): 3784-3790.
- [69] KANG P, OGUNBO S O, ERICKSON D. High resolution reversible color images on photonic crystal substrates [J]. *Langmuir*, 2011, 27(16): 9676-9680.
- [70] KANAI T, LEE D, SHUM H C, et al. Gel-immobilized colloidal crystal shell with enhanced thermal sensitivity at photonic wavelengths [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(44): 4998-5002.
- [71] KUBO S, GU Zhongze, TAKAHASHI K, et al. Tunable photonic band gap crystals based on a liquid crystal-infiltrated inverse opal structure [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2004, 126(26): 8314-8319.
- [72] XIE Zhuoying, SUN Liguang, HAN Guozhi, et al. Optical switching of a birefringent photonic crystal [J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(19): 3601-3604.
- [73] CAI Guofa, Wang Jiangxin, LEE P S. Next-generation multifunctional electrochromic devices [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2016, 49(8): 1469-1476.
- [74] CHOU H H, NGUYEN A, CHORTOS A, et al. A chameleon-inspired stretchable electronic skin with interactive colour changing controlled by tactile sensing [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8011.
- [75] LLORDES A, GARCAI G, GAZQUEZ J, et al. Tunable near-infrared and visible-light transmittance in nanocrystal-in-glass composites [J]. *Nature*, 2013, 500(7462): 323-326.
- [76] THAKUR V K, DING G Q, MA J, et al. Hybrid materials and polymer electrolytes for electrochromic device applications [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(30): 4071-4096.
- [77] LIANG Lin, ZHANG Jiajia, ZHOU Yingying, et al. High-performance flexible electrochromic device based on facile semiconductor-to-metal transition realized by WO₃ center dot 2H(2)O ultrathin nanosheets [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1936.
- [78] LAYANI M, DARMAWAN P, FOO W L, et al. Nanostructured electrochromic films by inkjet printing on large area and flexible transparent silver electrodes [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(9): 4572-4576.
- [79] 陈花玲, 周进雄. 介电弹性体智能材料力电耦合性能及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [80] 陈花玲, 王永泉, 盛俊杰, 等. 电活性聚合物材料及其在驱动器中的应用研究 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(6): 205-214.
- CHEN Hualing, WANG Yongquan, SHENG Junjie, et al. Research of electro-active polymer and its application in actuators [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 205-214.
- [81] NGUYEN C T, PHUNG H, NGUYEN T D, et al. A small biomimetic quadruped robot driven by multistacked dielectric elastomer actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(6): 065005.
- [82] NGUYEN C T, PHUNG H, HOANG P T, et al. A novel bioinspired hexapod robot developed by soft dielectric elastomer actuators [C]//*Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017, 6233-6238.
- [83] SUN Wenjie, LIU Fan, MA Ziqi, et al. Soft mobile robots driven by foldable dielectric elastomer actuators [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(8): 084901.
- [84] LI Wenbo, ZHANG Wenming, ZOU Hongxiang, et al. A fast rolling soft robot driven by dielectric elastomer [J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(4): 1630-1640.
- [85] HENKE E F M, SCHLATTER S, ANDERSON I A. Soft dielectric elastomer oscillators driving bioinspired robots [J]. *Soft Robotics*, 2017, 4(4): 353-366.
- [86] LI Bo, CAI Yong, JIANG Lei, et al. A flexible morphing wing by soft wing skin actuation utilizing dielectric elastomer: experiments and electro-aerodynamic model [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(1): 015031.
- [87] 陈花玲, 朱子才, 常龙飞, 等. 离子聚合物-金属复合材料变形机理及其基本特性 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [88] CHEN Zheng, UM T I, BART-SMITH H. Bio-inspired robotic manta ray powered by ionic polymer-

- metal composite artificial muscles [J]. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2012, 3(4): 296-308.
- [89] YE Zhihang, HOU Piqui, CHEN Zheng. 2D maneuverable robotic fish propelled by multiple ionic polymer-metal composite artificial fins [J]. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2017, 1(2): 195-208.
- [90] FENG Guohua, HUANG Weilun. A self-strain feedback tuning-fork-shaped ionic polymer metal composite clamping actuator with soft matter elasticity-detecting capability for biomedical applications [J]. *Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications*, 2014, 45: 241-249.
- [91] SIDERIS E A, DE LANGE H C, HUNT A. An ionic polymer metal composite (IPMC)-driven linear peristaltic microfluidic pump [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 6788-6795.
- [92] HE Qingsong, LIU Zhigang, YIN Guoxiao, et al. The highly stable air-operating ionic polymer metal composite actuator with consecutive channels and its potential application in soft gripper [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(4): 045013.
- [93] SHEN Qi, OLSEN Z, STALBAUM T, et al. Basic design of a biomimetic underwater soft robot with switchable swimming modes and programmable artificial muscles [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(3): 035038.
- [94] 唐刚强, 王延杰, 张磊, 等. 离子聚合物材料驱动的仿墨鱼喷射结构设计与研究 [J]. *功能材料与器件学报*, 2020, 26(3): 219-225.
- TANG Gangqiang, WANG Yanjie, ZHANG Lei, et al. Design and research of cuttlefish-like jet structure actuated by ionic polymer materials [J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2020, 26(3): 219-225.
- [95] WANG Yanjie, LIU Jiayu, ZHU Denglin, et al. Active tube-shaped actuator with embedded square rod-shaped ionic polymer-metal composites for robotic-assisted manipulation [J]. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2018, 2018: 4031705.
- [96] WANG Keli, WANG Yanjie, ZHU Zicai, et al. Fabrication and characterization of IPMC actuated wing for flapping motion of butterfly [C]// *Proceedings of the 20th conference on Electroactive Polymer Actuators and Devices*. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2018: 278-286.
- [97] HUANG W, TOH W. Training two-way shape memory alloy by reheat treatment [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19(17): 1549-1550.
- [98] HUANG W, GOH H B. On the long-term stability of two-way shape memory alloy trained by reheat treatment [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2001, 20(19): 1795-1797.
- [99] LEE H T, KIM M S, LEE G Y, et al. Shape memory alloy (SMA)-based microscale actuators with 60% deformation rate and 1.6 kHz actuation speed [J]. *Small*, 2018, 14(23): 1801023.
- [100] RODRIGUE H, WEI Wang, BHANDARI B, et al. Fabrication of wrist-like SMA-based actuator by double smart soft composite casting [J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(12): 125003.
- [101] GRANBERRY R, ESCHEN K, HOLSCHUH B, et al. Functionally graded knitted actuators with NiTi-based shape memory alloys for topographically self-fitting wearables [J]. 2019, 4(11): 1900548.
- [102] YOUNG J H, HYEON K, MA J H, et al. A piecewise controllable tunable lens with large aperture for eye-wear application [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(12): 124001.
- [103] PARK S J, KIM U, PARK C H. A novel fabric muscle based on shape memory alloy springs [J]. *Soft Robotics*, 2019, 7(3): 321-331.
- [104] KANG M, PYO Y, JANG J Y, et al. Design of a shape memory composite (SMC) using 4D printing technology [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 283: 187-195.
- [105] HAINES C S, LIMA M D, LI Na, et al. Artificial muscles from fishing line and sewing thread [J]. *Science*, 2014, 343(6173): 868-872.
- [106] WU Lianjun, CHAUHAN I, TADESSE Y. A novel soft actuator for the musculoskeletal system [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(5): 1700359.
- [107] KIM K, CHO K H, JUNG H S, et al. Double helix twisted and coiled soft actuator from spandex and nylon [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(11): 1800536.
- [108] TANG Xintian, LI Kai, LIU Yingxiang, et al. A general soft robot module driven by twisted and coiled actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(3): 035019.
- [109] TANG Xintian, LI Kai, LIU Yingxiang, et al. A soft crawling robot driven by single twisted and coiled actuator [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2019, 291: 80-86.

- [110] CHEN Shoue, CAO Yunteng, SARPARAST M, et al. Soft crawling robots: design, actuation, and locomotion [J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5(2): 1900837.
- [111] 李博, 王延杰, 赵鹏飞, 等. 电活性聚合物驱动的仿生变色伪装技术研究进展 [J]. 科技导报, 2018, 36(21): 99-108.
- LI Bo, WANG Yanjie, ZHAO Pengfei, et al. Research progress of electroactive polymer actuated biomimetic coloration in camouflage [J]. Science and Technology Review, 2018, 36(21): 99-108.
- [112] WANG Yanjie, ZHANG Lei, LI Bo, et al. Voltage-heating responsive and patternable solvatochromism display utilizing nickel complex-Nafion film composites [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(8): 1-9.

(编辑 武红江)