

文章编号: 1008-9357(2025)05-0457-14

DOI: 10.14133/j.cnki.1008-9357.20250603001

聚氯乙烯凝胶致动器的研究进展:材料、结构及应用

张弛¹, 张博¹, 孙岩辉¹, 钦建国², 朱子才³, 唐振华^{1,4}, 刘学婧²

(1. 长安大学道路施工技术装备教育部重点实验室, 西安 710064; 2. 西安工程大学机电工程学院, 西安 710048; 3. 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049; 4. 重庆大学航空航天学院, 重庆 400044)

摘要: 聚氯乙烯(PVC)凝胶是一类能够在电场激励下产生收缩、弯曲、面内扩张等多种变形模式的高分子聚合物,具有响应快、成本低、质量轻、机电转换效率高等优点,是一种理想的人工肌肉。本文综述了PVC凝胶近些年的发展现状,包括材料的组成、性能优化、制备工艺、新型构型设计及应用。重点介绍了通过掺杂功能添加剂来提升PVC凝胶的机电性能,以及利用3D打印、热熔成型等新型制备工艺实现PVC凝胶材料的快速制备。在传统阳极吸附型PVC凝胶致动器构型基础上,详细讨论了基于静电压缩和静电力耦合驱动两种原理所设计的新型PVC凝胶致动器。随后,系统介绍了PVC凝胶致动器在柔性驱动、医疗和光学这三个领域的应用。最后,对PVC凝胶材料现阶段所遇到的技术瓶颈及发展趋势进行了讨论。

关键词: 聚氯乙烯凝胶; 智能材料; 柔性驱动; 3D打印; 光学

中图分类号: TB381

文献标志码: A

Progress on Research of Polyvinyl Chloride Gel Actuators: Materials, Structures and Applications

ZHANG Chi¹, ZHANG Bo¹, SUN Yanhui¹, QIN Jianguo², ZHU Zicai³, TANG Zhenhua^{1,4}, LIU Xuejing²

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 4. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Polyvinyl chloride (PVC) gel is a class of polymers that is able to contract, bend, or expand under an applied voltage. PVC gel features a fast response, low cost, light weight, and high electromechanical efficiency, making it a promising candidate for artificial muscles. This paper reviews recent progress on PVC gel, including its compositions, modifications, fabrication technologies, design of novel configurations, and applications. This paper emphasizes the improvement of electromechanical performance of PVC gel through doping with functional additives, as well as rapid manufacturing techniques such as 3D printing and thermal melt processing. Based on the conventional configurations of PVC gel actuators

收稿日期: 2025-06-03

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2022 JQ-340); 道路施工技术装备教育部重点实验室(长安大学)开放基金(300102255502)

作者简介: 张弛(1990—),男,山东单县人,博士,主要研究方向为电致动聚合物改性及应用。E-mail: czhang@chd.edu.cn

通信联系人: 唐振华, E-mail: zhtang@cqu.edu.cn; 刘学婧, E-mail: lisa890329@163.com

引用格式: 张弛, 张博, 孙岩辉, 钦建国, 朱子才, 唐振华, 刘学婧. 聚氯乙烯凝胶致动器的研究进展: 材料、结构及应用 [J]. 功能高分子学报, 2025, 38(5): 457-470.

Citation: ZHANG Chi, ZHANG Bo, SUN Yanhui, QIN Jianguo, ZHU Zicai, TANG Zhenhua, LIU Xuejing. Progress on Research of Polyvinyl Chloride Gel Actuators: Materials, Structures and Applications [J]. Journal of Functional Polymers, 2025, 38(5): 457-470.

employing anode-crawling mechanism, two novel deformation modes of PVC gel, namely electrostatic mode and electrohydraulic mode, are discussed in detail. Moreover, the applications of PVC gel in soft actuation, as well as in medical and optical fields, are systematically reviewed. Finally, the current challenges and future development trends facing PVC gel are discussed.

Key words: polyvinyl chloride gel; smart material; soft actuation; 3D printing; optics

传统机械设备多以刚性硬质材料为基础,具备操作精度高、输出能量大、重复工作稳定性强等优势,但存在结构复杂、质量体积大、能量损耗高及人机交互安全性不足等固有缺陷。伴随软体机器人及柔性可穿戴设备等领域的发展,具备类似自然肌肉变形特性的智能材料逐渐成为研究热点,该类材料能够在外界刺激下通过物理或化学特性的可逆变化实现动态响应,相较于传统驱动模式,具有质量轻、结构紧凑、效率高、环境适应性强、耐冲击等显著优势,在抗震救灾、深海探测、医疗体内植入等极端场景中,该类材料展现出不可替代的应用价值。

电致动聚合物 (Electroactive polymers, EAPs) 隶属于智能材料,通过外加电压或电流来改变自身的物理化学特性^[1]。相较于电场型 EAPs(如介电弹性体 (Dielectric elastomer, DE)) 和离子型 EAPs(如离子聚合物金属材料 (Ionic polymer metal composite, IPMC)), 聚氯乙烯 (PVC) 凝胶致动器凭借其卓越的综合性能脱颖而出,被认为是一种理想的人工肌肉材料。PVC 凝胶与 DE 和 IPMC 的主要性能参数对比如表 1 所示。PVC 凝胶的制备工艺简单、模量调节范围广 (0.1~100 kPa)、驱动电压适中 (低于 500 V)、响应速率快 (低于 100 ms),且寿命长 (循环电压刺激下,寿命可达 1 000 000 次)^[2]。PVC 凝胶致动器通常采用三明治结构,由作为芯层的 PVC 凝胶以及两侧的电极组成。当施加电压时,由阴极注入的电子会在阳极周围聚集形成富集层,并与极性塑化剂分子重新排布相耦合,促使材料朝向阳极吸附,从而使整体结构在厚度方向上减小(图 1)。通过增加堆叠层数,可以显著增大驱动位移。这一特性使得 PVC 凝胶致动器在多个领域得到了广泛应用,包括医疗康复^[3]、仿生机器人^[4]以及可调谐光学等^[5]。

表 1 PVC 凝胶与 DE 和 IPMC 的主要性能参数对比

Table 1 Comparison of PVC gel with DE and IPMC on main properties

Type of EAPs	Voltage/V	Strain	Response time/ s
PVC gel ^[2]	50~500	10%~20%	<0.1
DE ^[6]	>1000	>20%	0.001~1
IPMC ^[7]	1~10	0.5%~2%	1~10

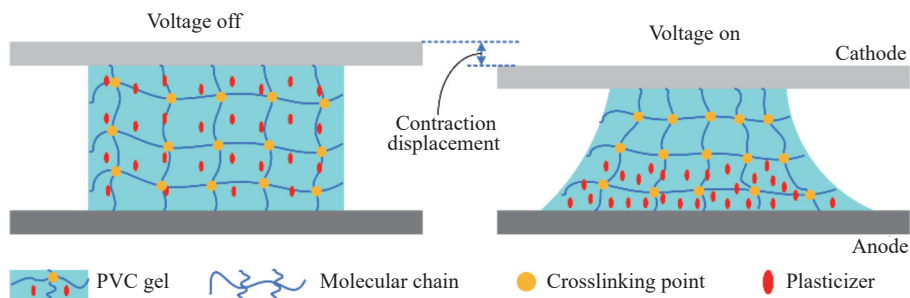


图 1 PVC 凝胶阳极吸附变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the anode creeping deformation of PVC gel

近年来, PVC 凝胶致动器以其优异的性能受到了广泛关注。众多学者围绕 PVC 凝胶致动器的材料改性、制备工艺、新型构型设计以及应用等方面开展了深入研究,并取得了显著进展。然而,目前缺乏对 PVC 凝胶致动器在 PVC 凝胶原材料、结构设计及应用方面的系统性梳理和总结。基于此,本文对近年来 PVC 凝胶致动器的研究进展进行全面梳理:首先,简要介绍制备 PVC 凝胶的原材料以及各组分对 PVC 凝胶膜性能的影响,重点探讨通过掺杂功能添加剂、PVC 树脂材料改性和 PVC 凝胶膜表面处理这三种方式来提升 PVC 凝胶

致动器性能的策略;其次,阐述 PVC 凝胶的制备工艺,并对各种制备工艺的特点进行比较分析;然后,介绍 PVC 凝胶致动器的结构和构型设计,涵盖阳极吸附型、静电压缩型和静电液力耦合型等类型;最后,阐述 PVC 凝胶致动器在柔性驱动、医疗康复和可调谐光学等领域的应用,并对 PVC 凝胶致动器的研究进展及存在问题进行总结与展望。

1 PVC 凝胶原材料及改性技术

PVC 凝胶是通过将高分子 PVC 树脂与塑化剂在特定条件下进行物理共混而形成的凝胶态空间网络结构,其材料组成通常包括 PVC 树脂、塑化剂、溶剂以及功能添加剂。

1.1 PVC 树脂

PVC 树脂是一种具有三维交联网络的半结晶聚合物。已有研究^[8]表明,不同分子量的 PVC 树脂所制备的 PVC 凝胶性能存在显著差异。具体而言,PVC 凝胶的模量、承载能力以及介电常数均会随着 PVC 树脂分子量的增大而呈现增大的趋势^[9]。虽然较高的分子量可以使材料具有更好的机械强度,但在一定程度上也会限制材料的变形;而过低的分子量又难以成膜或者使获得的 PVC 凝胶力学性能较差。因此,在实际制备过程中,应根据需求合理地选择 PVC 树脂的分子量。

目前,制备 PVC 凝胶大多使用粉末状 PVC 树脂,需要先将其溶解。Ali 等^[10]采用塑料溶胶法制备了 PVC 凝胶致动器,这一方法不仅简化了制备工艺,还大幅缩短了制备时间。他们所制备的 PVC 凝胶致动器具有优良的力学性能,为 PVC 凝胶的制备提供了新的思路,同时也为开发新型制备工艺提供了可能。

1.2 塑化剂

塑化剂作为 PVC 凝胶的关键成分,其种类和用量对于 PVC 凝胶的最终性能至关重要。PVC 树脂本身是一种硬质聚合物,塑化剂能够插入 PVC 分子链之间,削弱分子链间的相互作用力,从而使 PVC 在室温下展现出柔软、橡胶态的凝胶特性。此外,塑化剂还通过溶剂化作用促使 PVC 分子链在外加电场作用下发生取向和位移,进而赋予 PVC 凝胶电致变形特性。众多学者对已有的多种塑化剂进行了深入研究,并初步探究了塑化剂对 PVC 凝胶性能的影响规律^[11-13]。Uddin 等^[12]系统研究了邻苯二甲酸二辛酯(DOP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、己二酸二辛酯(DOA)和偏苯三甲酸三辛酯(TOTM)这4种塑化剂对 PVC 凝胶的力学性能(模量和断裂伸长率)、机电性能(阳极吸附表面积、形变量、响应时间、弯曲角度)以及寿命的影响。Hirai 等^[13]研究了 DOP、DBP、己二酸二乙酯(DEA)和癸二酸二丁酯(DBS)含量对 PVC 凝胶的阳极吸附、弯曲、收缩变形和吸附力的影响规律,并从阳极电荷积累的角度对变形特性进行了初步解释。上述研究只探究了使用单一塑化剂的情况。然而,单一塑化剂对 PVC 凝胶性能的调控较为有限,表现为某种性能的提升通常伴随着其他性能的衰减。此外,上述使用的各种类型的塑化剂大多具有一定的毒性,尽管成品 PVC 凝胶中的塑化剂逸出量较少,但是在制备过程中难免会造成塑化剂的泄漏,因此使用环境友好型的塑化剂就成为研究的重中之重。Bae 等^[5]在制作基于 PVC 凝胶的变焦透镜时,使用了一种可生物降解的塑化剂乙酰柠檬酸三丁酯(ATBC),避免了传统塑化剂对人体健康和环境的影响。Bae 团队^[14]进一步合成了一种新型的环境友好型塑化剂环己烷二羧酸酯(CHDC),并利用该塑化剂设计了一种微型透镜,相较于传统凝胶,PVC/CHDC 凝胶具有响应速率快(0.4 s)、漏电流小(小于 2 μ A)以及生物兼容性好等优点。

现阶段对塑化剂的研究大多以宏观实验结果分析为主,缺少相应的微观层面的解释。Li 等^[15]从分子间作用力的角度,采用实验与仿真相结合的方法,系统研究了4种不同结构形态的塑化剂分子,即己二酸二丁酯(DBA)、对苯二甲酸二辛酯(DOTP)、ATBC 和 TOTM 对 PVC 凝胶致动器性能的影响。研究表明,塑化剂分子与 PVC 分子链之间的作用力会影响塑化剂分子的运动速率,从而对 PVC 凝胶致动器的变形程度和响应速率产生影响。相较于具有芳香环的塑化剂(DOTP 和 TOTM),线形塑化剂(DBA 和 ATBC)的分子间作用力更小,从而具有更大的驱动位移及驱动力。该结果与本课题组研究的经验性结果基本一致,即 PVC/DBA 凝胶的性能最佳。该研究为塑化剂的选择以及致动器性能的优化提供了理论指导。

1.3 溶剂

由于 PVC 树脂在没有溶剂的情况下不能被塑化剂溶解,因此在制备 PVC 凝胶的过程中,需要引入溶剂。理想的溶剂应满足以下要求:能够快速溶解 PVC 树脂并形成均匀混合溶液,在 PVC 凝胶成膜过程中快速挥

发,成膜后基本无残留,且挥发过程对PVC凝胶成膜的影响较小。Aoki等^[16]通过实验证明了四氢呋喃(THF)是一种理想的PVC溶剂,因此THF成为了现阶段使用最广泛的溶剂。

此外,溶剂的用量会对混合液的黏度和流动性产生影响,在不同黏度和交联温度下,溶剂的挥发速率不同,最终会影响成膜质量,如平整度和内部孔隙率等。因此,需要精确地控制溶剂的用量和挥发速率。

1.4 PVC凝胶改性

通常利用掺杂改性工艺来提高PVC凝胶的性能,即将液体或固体小颗粒以功能添加剂的形式添加到PVC/DBA体系中,从而提高PVC凝胶材料的介电常数或降低其弹性模量,最终获得驱动性能优异的PVC凝胶致动器。Hirai等^[17]研究了4种离子液体(三己基(十四烷基)膦甲磺酸盐、三己基(十四烷基)十二烷基苯磺酸盐、三己基(十四烷基)氯化膦和甲磺酸四丁基磷)对PVC介电凝胶致动器的影响。研究表明,离子液体的加入会对凝胶的形成过程、塑化剂的逃逸行为、材料的柔韧性以及老化现象等产生影响。含有Cl⁻的离子液体与PVC凝胶的相容性最好,且与其他离子液体相比,含有Cl⁻的PVC凝胶具有更高的介电常数、更低的能量损耗以及更好的变形性能。Li等^[18]进一步系统研究了3种离子液体(1-烯丙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐([AMIM]BF₄)、1-烯丙基-3-乙基咪唑四氟硼酸盐([AEIM]BF₄)和1-烯丙基-3-丁基咪唑四氟硼酸盐([ABIM]BF₄))对PVC凝胶微观结构(分子链排列、塑化剂分布、界面相互作用)的调控机制,揭示了离子液体对PVC凝胶电致形变性能(驱动应变、响应速率、迟滞效应)的增强作用,阐明了离子液体与PVC/塑化剂体系的多物理场耦合机制(离子迁移、介电极化、界面滑移)。该研究系统揭示了离子液体在PVC凝胶中的“离子-电子”双导电网络构建机制,提出通过选择离子液体类型(如阴离子尺寸、极性等)调控材料刚柔特性的策略,对于PVC凝胶致动器的性能优化具有重要的理论价值。

通过纳米填料直接混合的方法也可以改善PVC凝胶的性能。Park等^[19]将具有高介电常数的二氧化硅(SiO₂)无机纳米颗粒掺杂到PVC凝胶中,并利用翻模浇铸法获得了具有表面波纹结构的PVC凝胶,由该凝胶制得的振动触觉致动器具有更好的驱动性能以及更低的功耗。Hwang等^[20]通过在PVC凝胶中添加纳米氧化石墨烯(GO),成功将PVC凝胶的驱动变形增大了20%,同时其输出力和输出功率分别提高了41%和36%。相较于离子液体,该类功能添加剂会对PVC凝胶的透光率产生影响。当GO质量分数达到0.1%时,PVC凝胶会从透明状态变为黑色不透明状态,这在一定程度上限制了PVC凝胶在光学领域的应用。Huang等^[21]尝试将有机纳米填料氰乙基纤维素(CEC)掺杂到PVC凝胶中,PVC凝胶的介电常数由7.6提高到18.9,同时黏弹性显著降低,所得到的PVC凝胶相较于无添加的样品,其驱动性能提高了一倍。

此外,也有一些学者尝试使用新型PVC树脂或对PVC凝胶膜表面进行改性处理,以提高PVC凝胶的性能。Li等^[22]使用氯化聚氯乙烯(CPVC)粉末来制备PVC凝胶,并研究了CPVC凝胶致动器的性能。相较于PVC粉末制备的凝胶(即PVC凝胶),CPVC凝胶在小载荷下具有更大的驱动变形,而当负载较大时,CPVC凝胶的变形会显著减小。该类致动器适用于负载较小但对变形需求较大的场景。Zhang等^[23]利用氧和氩等离子体对成品PVC凝胶表面进行改性处理,并采用和频振动光谱技术(SFG)、相干反斯托克斯拉曼光谱法(CARS)和X射线光电子能谱(XPS)等多种方法对材料表面进行表征。结果表明,等离子体处理可以有效破坏PVC凝胶表面的C—Cl键,同时在塑化剂和PVC之间形成相互作用力更强的新化学键,从而有效抑制塑化剂(特别是DBA)的逸出,使PVC凝胶具有更好的长期稳定性以及更小的环境危害性,然而,他们并未探讨等离子体处理对PVC凝胶致动器变形性能的影响。

2 PVC凝胶制备工艺

根据PVC凝胶制备过程所耗时长,可以将制备工艺分为溶液浇铸法和快速成型法两大类^[23-31]。目前使用最多的是溶液浇铸法,基本步骤是将制备好的PVC树脂、塑化剂、溶剂混合溶液倒入特定模具中进行浇铸,随后在常温下蒸发交联,待溶剂完全挥发后,最终形成成品膜,制备过程如图2(a)所示。为了保证最终获得的PVC凝胶膜厚度均匀,最简单的方法是将混合溶液倒入调平后的烧杯或者培养皿中固化成膜^[20,24],该方法可以制备厚度在几百微米至几毫米的PVC凝胶膜,但是所得成品的厚度均匀性较差。在某些领域,需要制备厚度在几十甚至几微米级别的薄膜,此时可以采用匀胶机旋涂法(图2(b))^[23],该方法制备的薄膜厚度均匀,但是单次加工面积有限,且因成品膜厚度较小、不易转移,对底板的要求比较高。此外,也有学者采用中小型的

流延机来制备 PVC 凝胶薄膜^[25]。该方法制备的薄膜厚度及均匀性介于旋涂和浇铸之间, 但产量相较于前两者有了大幅提高。Dong 等^[26]通过设计专用的大型流延机, 已经初步实现了 PVC 凝胶膜的批量化生产, 为 PVC 凝胶致动器的商业化提供了可能(图 2(c))。

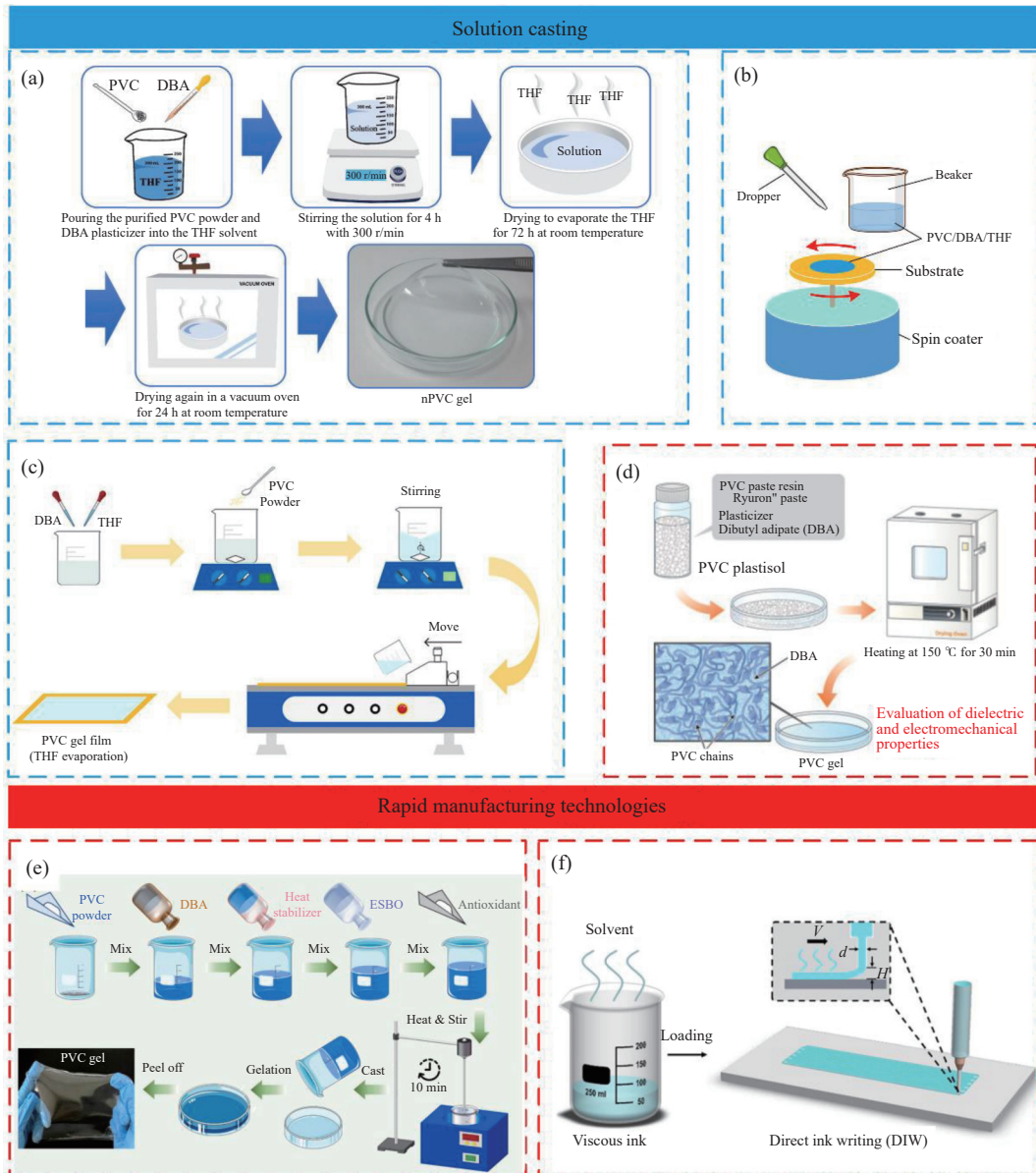


图 2 PVC 凝胶不同制备工艺示意图: (a) 平底容器溶液浇铸^[32]; (b) 旋涂^[23]; (c) 流延^[26]; (d)PVC 塑料溶胶热固化^[10]; (e) 快速热熔技术^[28]; (f) 3D 打印^[31]

Fig. 2 Schematic diagram of various fabrication technologies of PVC gel: (a) Solution casting on flat-bottomed container^[32]; (b) Spin coating^[23]; (c) Blade casting^[26]; (d) Hot curing of PVC plastisol^[10]; (e) Rapid thermal melting technique^[28]; (f) 3D printing^[31]

为保证 PVC 凝胶的性能, 溶剂的挥发速率不宜过快, 因此大多采用室温固化的方式, 该过程通常需要 4~7 d, 时间成本较高, 并且挥发的溶剂容易刺激皮肤与眼睛, 环保性较差。Ali 等^[10]提出了一种加热制备 PVC 凝胶的方法, 该方法如图 2(d) 所示。首先, 将经甲醇洗涤的 PVC 树脂与 DBA 混合, 在搅拌 1 d 后形成 PVC 塑化溶胶。然后, 将适量的塑化溶胶放入玻璃培养皿中, 并在 150 °C 的电炉中固化 30 min。最后, 冷却后得到透明柔软的 PVC 凝胶。Helps 等^[27]也使用了加热增速的方法来制备 PVC 凝胶。首先, 将 PVC 颗粒与高闪点的己二酸二异癸酯 (DIDA) 塑化剂混合形成塑化溶胶, 然后在约 130 °C 下缓慢加热至糊状物。最后, 在约 170 °C 下加热糊状物或在 180 °C 下热压糊状物, 获得 PVC 凝胶。Wu 等^[28]提出了一种新型的快速热熔法, 可以在 10 min 内完成 PVC 凝胶的制备(图 2(e)), 大大提高了 PVC 凝胶的制备效率。采用该方法制备的 PVC 凝胶致动性能显著提升, 其收缩应变达到 20.62%, 输出力为 0.43 N, 恢复响应时间为 1.416 s, 这些性能指标均优

于传统制备方法。上述工艺均摒弃了溶剂的使用,且制备时间相较于溶液浇铸法大大缩短,为实现快速、经济、简易的PVC凝胶致动器制备奠定了基础。

近年来,3D打印技术的快速发展为制备具有复杂结构的PVC凝胶提供了可能。Helps等^[27]进行了初步实验证明了3D打印PVC凝胶的可行性。Luo等^[29,30]将直写打印技术与PVC凝胶制备工艺相结合,打印了性能优异的PVC凝胶致动器;同时实现了网状的碳纳米管(CNT)/聚二甲基硅氧烷(PDMS)电极与PVC凝胶的同步打印,为全柔性PVC凝胶致动器的实现提供了可能。Wang等^[31]提出了一种电可控3D打印PVC凝胶的方法,首次实现了PVC凝胶的梯度打印和具有表面微结构的PVC凝胶的制备,并成功将其应用于软体仿生水母及智能窗户领域(图2(f))。相较于溶液浇铸法,3D打印技术在制备复杂构型时具有一定的优势,但其成本较高、效率较低,难以实现大规模批量化生产。

3 PVC凝胶致动器构型设计

为了满足不同应用领域的需求,PVC凝胶致动器被设计成多种构型,以实现厚度收缩、面内扩张、弯曲以及其他复杂的变形。根据不同的变形机理,可以将PVC凝胶致动器分为阳极吸附型、静电压缩型和静电力耦合型三大类^[33-46]。

尽管PVC凝胶的准确变形机理尚未完全揭示,但普遍认为导致材料阳极吸附行为的主要原因是电场作用下注入电子的定向运动以及极性塑化剂分子的重排布。基于此现象,Yamano等^[33]提出了一种叠层PVC凝胶致动器,其在厚度方向能够产生较大收缩变形(图3(a))。该致动器单元具有三明治结构,包括中间层的PVC凝胶芯层、作为阳极的金属网电极和作为阴极的金属箔电极。在电场作用下,金属网一侧的PVC凝胶发生阳极吸附现象,一部分PVC凝胶填充了金属网的网孔空间,将其中的空气排出。从宏观角度看,这使得驱动单元实现了厚度方向的收缩。单个致动器的变形较小,往往通过叠层的方式获得较大的驱动位移。该实验获得了13%的厚度收缩应变,1~3 Hz的响应频率以及1~2 kPa的输出应力。在此基础上,众多学者针对叠层凝胶致动器开展了深入研究,使得叠层PVC凝胶构型成为目前应用最为广泛的致动器类型^[34,35]。Liu等^[34]综合考虑了金属网的线径、目数和孔隙率,计算出了最优的阳极网格尺寸。Li等^[35]进一步提出了一种基于不锈钢网的模块化叠层PVC凝胶致动器,该致动器通过调节塑化剂含量并优化金属丝网的结构参数,将致动器的收缩应变提高到20%,响应频率提高到10 Hz,同时性能稳定性极好。由于使用金属电极,该类致动器的质量通常较大,且柔性有限,并未实现真正意义上的全柔性,多用于尺寸空间较大的场所。

除了上述使用的金属网电极外,有些学者还提出了其他的设计方案。如Helps等^[36]采用翻模法在PVC凝胶的一侧加工了多种微型结构。具有V形表面微结构的致动器具有高达26%的厚度收缩应变,高于现有的使用金属网电极的PVC凝胶致动器(图3(b))。Helps等^[36]进一步尝试使用柔性电极制备全柔性的PVC凝胶致动器,并获得了约13%的驱动应变。Park等^[37]使用编织工艺将长条PVC凝胶制备成编织物并将其置于两个平面电极之间;在阳极吸附和静电压缩的耦合作用下,致动器表现出一定的厚度收缩应变;并进一步将其应用于小型触觉反馈装置,为柔性可穿戴装置的研发提供了研究思路。Wang等^[31]通过3D打印技术制备了具有表面微结构的PVC凝胶,并在其两侧集成了透明电极(氧化铟锡(ITO)玻璃)。该致动器在电场作用下不仅发生厚度方向的收缩变形,还能实现从不透明到透明的可逆光学转变,兼具力学致动与动态光学调控功能,为新型智能窗户的开发提供了可能。上述两种致动器的特点是阴、阳极均使用平面型电极,轻量化和柔性相较于使用金属网电极的致动器有所提高。

此外,利用PVC凝胶的阳极吸附特性,还可以实现弯曲变形,从而拓展了致动器的应用领域。Hirai等^[38]首先研究了PVC凝胶的蠕变效应与电场诱导弯曲的耦合机制,在60 s内致动器实现了80°的弯曲变形。Shin等^[9]研究表明,当PVC树脂与PVC塑化剂的质量比为1:11时,致动器可在3.15 s内实现180°的弯曲变形。Wang等^[31]利用3D打印技术制备了弯曲型PVC致动器并将其应用于仿生水母领域,证明了该材料在仿生软体机器人领域应用的可行性(图3(c))。最后一类阳极吸附型致动器是编织型PVC致动器。Furuse等^[39]制备了具有芯鞘型结构的PVC凝胶线条,该线条中心为掺杂有CNT的导电PVC凝胶,外层包裹着PVC凝胶(图3(d)),接着利用纺织工艺设计了编织型PVC致动器和纱线型PVC致动器,两者在电场作用下,分别表现出了收缩

特性和伸长特性。该类致动器与叠层金属网致动器相比, 具有更好的结构紧凑性、柔顺性和布置的灵活性。

上述各种类型的致动器都是基于 PVC 凝胶的阳极吸附原理设计的。与此同时, PVC 凝胶也是一种性能优异的介电材料, 当其两侧涂覆有柔性或弹性电极时, 在电场作用下会表现出一定的面内扩张变形, 类似于电场型电致动聚合 DE 的变形特性^[6]。Li 等^[40]通过在 PVC 凝胶两侧涂覆碳膏电极, 设计了平面形 PVC 凝胶致动器。该致动器具有优异的驱动性能, 在 120 V 电压下, 能够在 90 ms 内实现 21% 的面内扩张应变率和 0.6 MPa 的输出应力, 该性能已接近生物肌肉, 优于叠层金属网 PVC 凝胶致动器。Li 等^[41, 42]进一步利用 PET 纤维对 PVC 凝胶进行单方向约束, 从而实现了 PVC 凝胶致动器的纯剪切变形, 在保持驱动应力和响应时间不变的情况下, 将驱动应变提高到了 40%(图 3(e)); 同时对该变形模式进行理论建模, 为致动器性能的优化提供了理论指导。Wang 等^[43]将 CNT 掺杂到 PVC 凝胶中, 制备了具有良好导电性的 PVC/CNT 弹性电极, 该电极与 PVC 凝胶之间具有很好的黏接强度, 为静电压缩型 PVC 凝胶致动器的进一步应用奠定了基础。

阳极吸附型和静电压缩型 PVC 凝胶致动器在电场作用下容易出现电击穿现象, 且击穿后无法修复, 使致动器失效。Katzschmann 课题组^[44]提出了一种静电液力耦合的柔性致动器 (HASEL), 该致动器具有响应速率快、变形大、循环寿命长、击穿后能自修复等特性, 在柔性驱动、仿生机器人领域得到了广泛的关注与研究。Kim 等^[45]在 HASEL 结构基础上, 利用 PVC 凝胶取代传统使用的硅橡胶和双向拉伸聚丙烯薄膜 (BOPP) 等材料, 实现了 HASEL 致动器的低电压驱动并获得了更大的驱动力 (图 3(f))。相较于使用硅橡胶外壳的 HASEL, 该致动器成功将驱动力由 1 N(7 kV) 提升至 3.2 N(2 kV), 同时探索了其在柔性可调焦透镜领域的应用。Jang

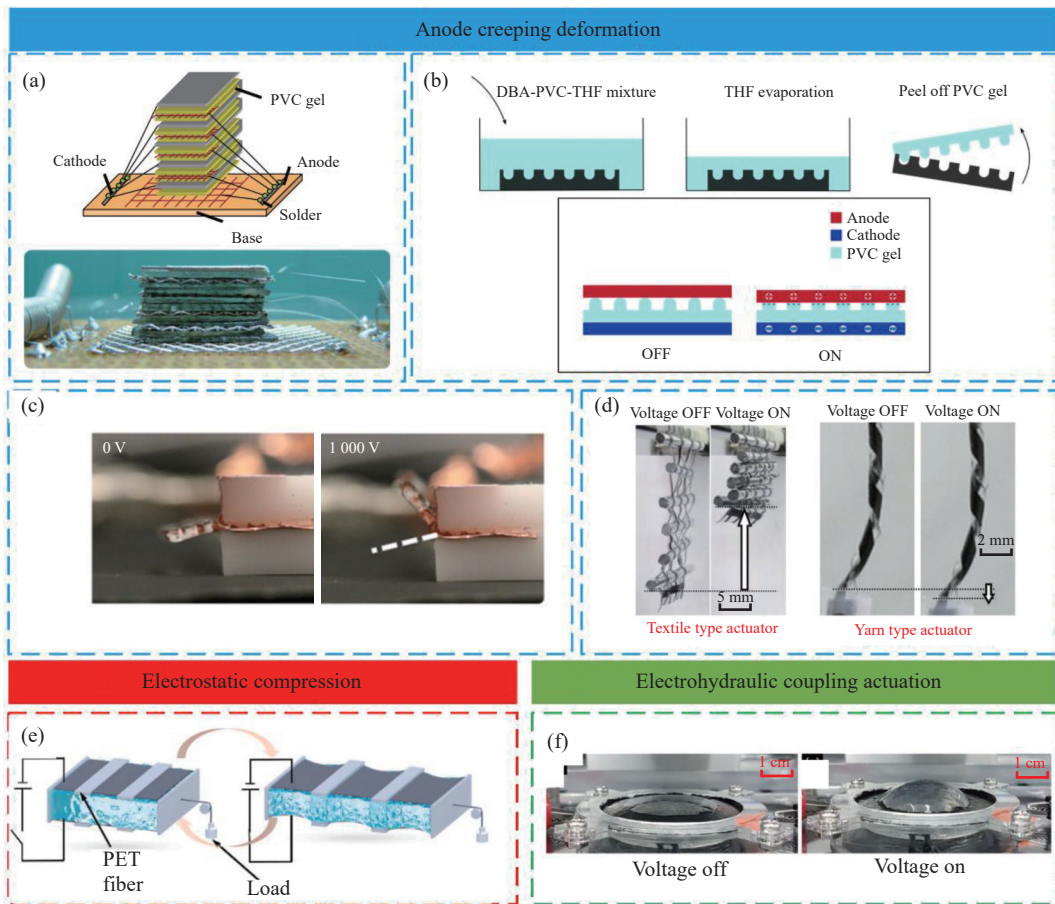


图 3 基于不同工作原理的多种类型的 PVC 凝胶致动器: (a) 具有网状电极的叠层 PVC 凝胶致动器结构示意图与原型样机^[33]; (b) 具有表面微结构的叠层 PVC 凝胶致动器制备原理与变形示意图^[36]; (c) 弯曲致动器^[31]; (d) 编织型和纺纱型致动器^[39]; (e) 纤维束缚的平面型 PVC 凝胶致动器^[41]; (f) 基于 PVC 凝胶的 HASEL^[45]

Fig. 3 Various types of PVC gel actuators based on different working principles: (a) Schematic diagram and prototype of stacked PVC gel actuators with meshed electrode^[33]; (b) Fabrication process and deformation of stacked PVC gel actuators with surface microstructures^[36]; (c) Bending actuators^[31]; (d) Textile and yarn actuators^[39]; (e) Fiber constrained planar PVC gel actuators^[41]; (f) PVC gel-based HASEL^[45]

等^[46]进一步设计了具有阵列式独立电极的 PVC/HASEL 致动器,首次实现了单一器件在形状变形与触觉反馈之间的无缝切换,为其在柔性电子、软体机器人、智能穿戴交互等领域的应用提供了可能。由于介电液的引入,该类致动器对于密封有着严格的要求。由于现阶段缺乏有效黏接 PVC 凝胶的黏合剂,只能选用与塑化剂不发生反应的硬质材料作为封装结构,这一限制不仅使其难以实现真正意义上的柔性化,也成为后续研究中亟待突破的关键问题。

4 PVC 凝胶致动器的应用

4.1 柔性驱动

目前应用较多的是能够在厚度方向实现收缩和舒张的叠层 PVC 凝胶致动器。Park 等^[47]设计了一种基于波纹状 PVC 凝胶的柔性触觉致动器(图 4(a)),该致动器可以在较宽的工作频率(0~300 Hz)范围内输出高达 6.86 m/s^2 的振动加速度。实验数据表明,该振动加速度能够可靠地激活人体皮肤中的触觉感受器,满足可穿戴设备对触觉反馈的基本要求。为提高致动器的性能,Park 等^[19]进一步将 SiO_2 纳米颗粒引入 PVC 凝胶,证明了 SiO_2 纳米颗粒能够显著提高致动器的灵敏性,且当 PVC 凝胶与 SiO_2 纳米颗粒的质量比为 1:0.1 时,灵敏性最佳。Li 等^[48]提出一种使用叠层 PVC 凝胶致动器的新型双指夹持器,由叠层 PVC 凝胶致动器、带有滑动槽的传动轴和夹具三部分组成(图 4(b))。夹持器的最大开合角约为 20° ,所能夹持的最大物体宽度为 40 mm,有效夹持力可达 4 N,可以稳定抓取各种形状和大小不规则的小物体,如电动胶带、塑料刷、胶水棒、记号笔等。Xu 等^[4]针对现有碳基电极导电率差和金属电极柔性差的缺点,开发了一种高电导率、低刚度的液态镓基合金电极,相较于传统电极,该电极具有更大的驱动应变和更长的循环寿命。他们还利用该新型电极进一步设计了多种仿生装置,如图 4(c)所示为间歇式蠕动机器人。Dong 等^[26]设计了一种由弹性骨架和叠层 PVC 凝胶致动器组成的对抗式仿生鱼尾,其结构如图 4(d)所示。仿生鱼尾利用两侧 PVC 凝胶致动器的交替

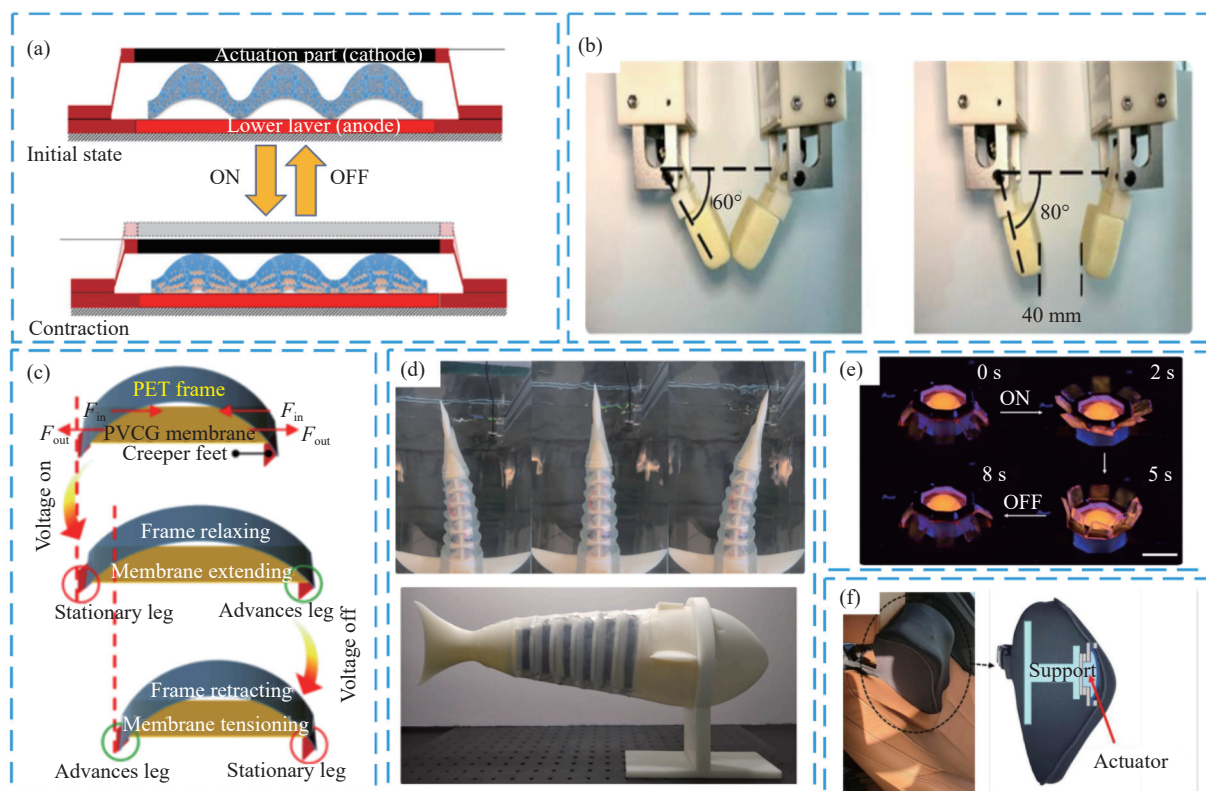


图 4 柔性驱动的应用: (a) 振动触觉致动器^[47]; (b) 基于 PVC 凝胶致动器的抓手^[48]; (c) 具有不易察觉的金属电极的 PVC 凝胶驱动的仿生机器人^[4]; (d) 仿生鱼尾^[26]; (e) 仿生水母^[31]; (f) 颈枕振动发生器^[49]

Fig. 4 Soft actuation applications: (a) Vibrotactile actuator^[47]; (b) PVC gel actuators-based gripper^[48]; (c) Bionic robots driven by PVC gel with imperceptible liquid metal electrode^[4]; (d) Bionic fishtail^[26]; (e) Bionic jellyfish^[31]; (f) Neck pillow vibration generator^[49]

驱动来实现整体结构的双向摆动, 从而模拟鱼尾的运动。该机器人具有 6 个自由度, 可以实现机器鱼的前进和游动方向的改变, 以及超过 12 h 的续航。Wang 等^[31]利用 3D 打印技术设计了一款仿生水母机器人, 该机器人利用 PVC 凝胶的弯曲变形成功模拟了水母的水下运动形态, 相应致动器可在数秒内实现高达 170° 的弯曲变形 (图 4(e))。上述三部分工作为未来的水下仿生机器人带来较大的启发。Chang 等^[49]设计并改进了基于 PVC 凝胶的 HASEL 致动器, 并通过优化介电液、电极和 PVC 凝胶的配比, 实现了舒适而细腻的振动 (图 4(f)), 该致动器显著改善了现有 HASEL 致动器存在的功率低、驱动电压高、耐久性不足等问题。此外, 通过设计控制电路和开发振动算法, 可将其应用于车辆颈枕中, 产生与车载音乐相呼应的振动。

4.2 医疗康复

近年来, 随着人们对医疗康复领域的重视, PVC 凝胶致动器因其优异的变形性能、良好的生物兼容性, 在医疗康复领域得到了广泛的研究与应用。在可穿戴外骨骼助力装置领域, Li 等^[3, 50, 51]做了大量的工作, 其研究成果如图 5(a~c) 所示。传统的外骨骼多采用电机加机械传动的方式, 存在结构复杂、质量大、生物兼容性差等一系列缺点。他们先后设计了三种应用于大腿的 PVC 凝胶助力装置, 利用致动器的收缩和膨胀变形产生的输出力来辅助行走, 同时优化了其控制电路与系统, 最终实现了结构简单、质量轻、灵活性高、穿戴舒适方便的柔性可穿戴助力装置。该装置可有效提高患者的步长与行走速率。Liu 等^[52]利用叠层 PVC 凝胶致动器设计了手指震颤抑制装置, 该装置质量轻 (25 g)、响应快 (小于 0.1 s) 且采用主动控制策略 (图 5(d))。当震颤频率在 3~6 Hz (手指震颤最常见的频率范围) 时, 主动吸收系统能够有效抑制手指震颤达 65%。Tian 等^[53]提出了一种基于 PVC 凝胶驱动的新型阵列式电活性人工肌肉致动器, 并将其应用于盲文显示器 (图 5(e)): 首先采用铸造工艺制备了四种不同表面结构的 PVC 凝胶并测试致动性能, 其中圆锥形和截头圆锥形阵列结构更有利于提升致动器的输出位移; 然后使用 Lippmann-Young 方程分析了 PVC 凝胶中的电润湿效应, 以解释具有不同表面结构接触角的 PVC 凝胶的性能差异; 最后将 6 个具有锥形表面阵列结构的叠层 PVC 凝胶致动器组成盲文显示器, 可以有效显示从 0 到 9 的盲文数字。以上研究为 PVC 凝胶致动器在未来医疗康复领域的应用奠定了一定的基础。

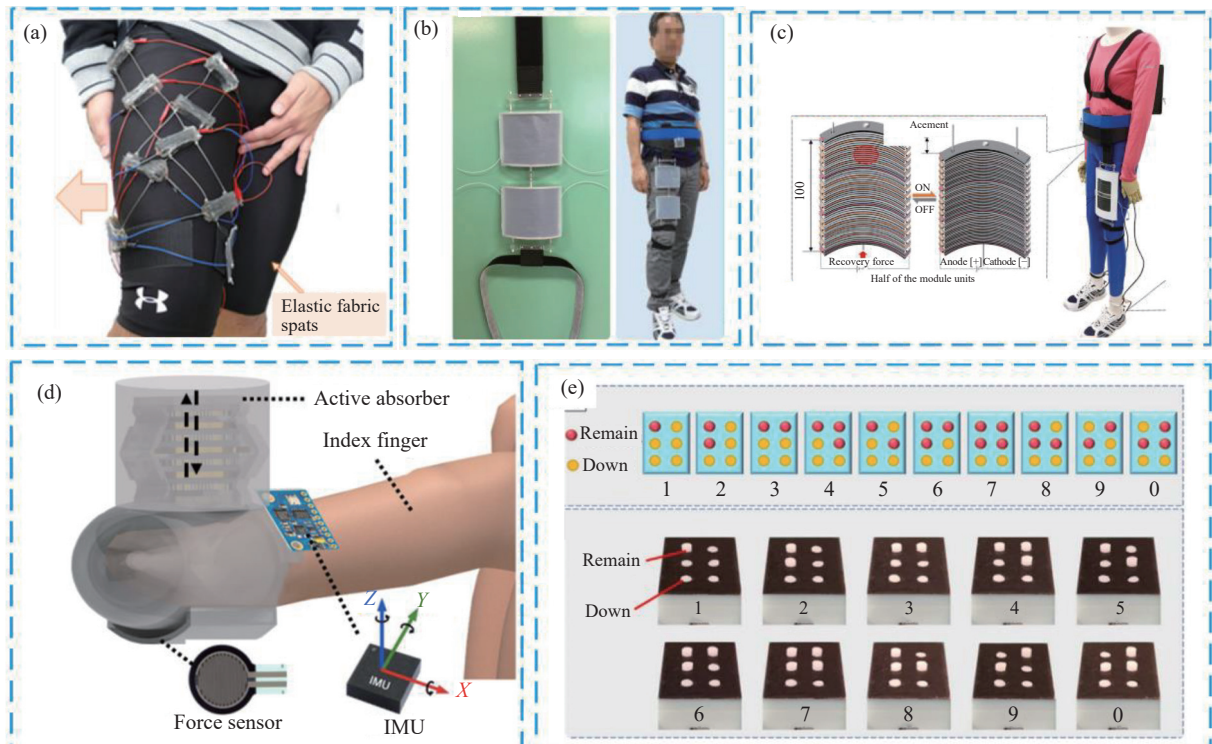


图 5 基于 PVC 凝胶致动器的医疗装置: (a) 柔软、可穿戴的辅助护套^[50]; (b) 助行服^[3]; (c) 升级版助行服^[51]; (d) 可穿戴手指震颤抑制矫形器^[52]; (e) 动态盲文显示器^[53]

Fig. 5 Medical devices based on PVC gel actuators: (a) Soft wearable assistive spats^[50]; (b) Walking assist wear^[3]; (c) Updated walking assist wear^[51]; (d) Wearable finger tremor-suppression orthosis^[52]; (e) Dynamic braille display^[53]

4.3 光学领域

PVC 凝胶具有透光率高、循环寿命长和稳定性好等特点,因此在光学领域的应用具有一定的优势^[54]。目前,基于 PVC 凝胶的光学器件主要分为两大类:变焦透镜和可调节透明度的智能窗户。

变焦透镜是利用 PVC 材料本体作为镜头,在通电情况下,PVC 材料靠近电极部分发生阳极吸附变形,从而改变了 PVC 材料的表面曲率,进而改变了入射光的折射角度,最终达到变焦的效果。在此领域,韩国的 Kim 及 Bae 团队做了大量的工作^[5, 14, 32, 55]; Bae 等^[5]创新性地提出了一种 ITO 玻璃/PVC 凝胶/导电印制电路板 (PCB) 的三明治结构透镜 (图 6(a)),其中 ITO 玻璃作为透明阴极,PCB 板上开有直径为 1 mm 的通孔,通孔侧壁镀有金属作为阳极。当施加一定的预压力时,处于中间芯层的 PVC 凝胶会在通孔部分凸起具有一定的曲率,形成透镜镜片。加电状态下,PVC 凝胶因阳极吸附作用而附着在通孔侧壁上,从而使通孔部分凸起的 PVC 凝胶曲率发生改变,进而改变镜头的焦距。该透镜能够在 500 V 电压下实现焦距在 5~15 mm 之间的变化。为提高透镜的变焦范围, Kim 团队^[32]进一步提出一种双 PCB 通孔电极构型:将两块通孔直径相同的印制电路板对称置于 PVC 凝胶两侧,形成复合驱动结构,如图 6(b) 所示。当输入电压为 0~400 V 时,焦距可以在 3~24.5 mm 之间变化。此外,透镜的视场角 (FOV) 变化范围为 121.9°~41.9°。在该双曲面透镜的基础上, Kim 团队^[55]成功引入了一种新型的高性能协同塑化非离子型 PVC 凝胶 (SPNIPGel)^[55]。通过一定的电压控制策略,该透镜可呈现出双凸、平凸、平凹、双凹四种构型,其变焦范围进一步扩大至 31.8~-11.3 mm (图 6(c))。除此之外, Bae 团队^[14]还在 PVC 凝胶的环保方面做了一定的工作,通过合成环境友好型塑化剂,减少了塑化剂对人体及环境的危害。

上述透镜的阴、阳电极分别位于两个不同的装置上。如图 6(a) 所示,透镜电极分别位于 PCB 板通孔侧壁和 ITO 玻璃上,导致该类透镜结构复杂,加工繁琐。Cheng 等^[56]将透镜的阴、阳电极一次性加工在同一个平面上,提出了如图 6(d) 所示的平面型透镜。该透镜具有广阔的变焦范围,能够在 1000 V 以内实现焦距从 -154.1 mm 到 -21.3 mm 的变化。为了降低驱动电压, Xu 等^[57]在 PVC 凝胶中掺杂了微量的离子液体 1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐 ([BMIM]PF₆),并通过实验研究了离子液体含量对驱动性能的影响规律。结果表明,当 [BMIM]PF₆ 掺杂量为 0.01% (质量分数) 时,驱动电压降低为未掺杂 PVC 凝胶的 1/22,所制备的 250 μm 光圈透镜在 5~7 V 电压驱动下,可实现 4.2~2.5 mm 的焦距变化。

由于 PVC 凝胶的变形能力有限,基于 PVC 凝胶本体的镜头设计通常存在光圈较小 (小于 1.5 mm) 的问题。考虑到 PVC 凝胶本身具有良好的致动特性 (如 5.1 部分所述),研究人员尝试利用 PVC 凝胶驱动液体镜头来实现变焦功能^[25, 58]。Song 等^[58]设计了一种以 PVC 凝胶为容器壁、ITO 玻璃为容器底的结构,在 PVC 凝胶腔体内注入甘油溶液。通电时,PVC 凝胶发生变形,从而改变溶液的表面曲率,实现了光路的调节 (图 6(e))。该设计的光圈直径可达 7 mm,焦距调节范围为 -∞~-22.57 mm 和 20.87 mm~+∞。Zhang 等^[25]提出了一种新型的弹性薄膜封装透明液体的结构。该结构采用环形叠层 PVC 凝胶致动器挤压透明液体,并通过改变光路部分弹性薄膜的曲率来实现焦距调节,如图 6(f) 所示。该透镜的光圈直径达 10 mm,在 0~250 V 电压范围内可实现高达 950% 的焦距变化率。

PVC 凝胶在光学领域的另一个应用是可调节透明度的智能窗户。智能窗户是一种能够动态调节透光率的功能器件,在隐私保护、光线管理和节能建筑等领域具有重要应用价值。Wang 等^[31]提出了一种基于 PVC 凝胶的智能窗户设计,其结构由表面具有微结构的 PVC 凝胶层和两侧的透明导电 ITO 玻璃组成 (图 6(g))。在初始状态下,PVC 凝胶表面的球形微结构会对入射光产生多重散射,导致器件呈现不透明特性。当施加外加电场时,PVC 凝胶在阳极吸附作用下发生形变,微结构逐渐填充相邻间隙,导致表面趋于平整。这一结构变化显著降低了光散射效应,从而使器件从光学不透明态转变为透明态。

5 总结与展望

近年来,PVC 凝胶致动器在材料 (包括原材料组成、改性、制备)、结构设计和应用方面取得了显著的研究进展。尽管如此,在材料的进一步产业化过程中,仍然面临着系列的挑战。

(1) PVC 凝胶的变形机理仍有待深入研究。目前,尽管已有诸多学者通过实验表征和数值模拟等方法对 PVC 凝胶的变形行为进行了探索,但对其力-电耦合作用机制仍缺乏系统完善的理论描述。这一理论体系的

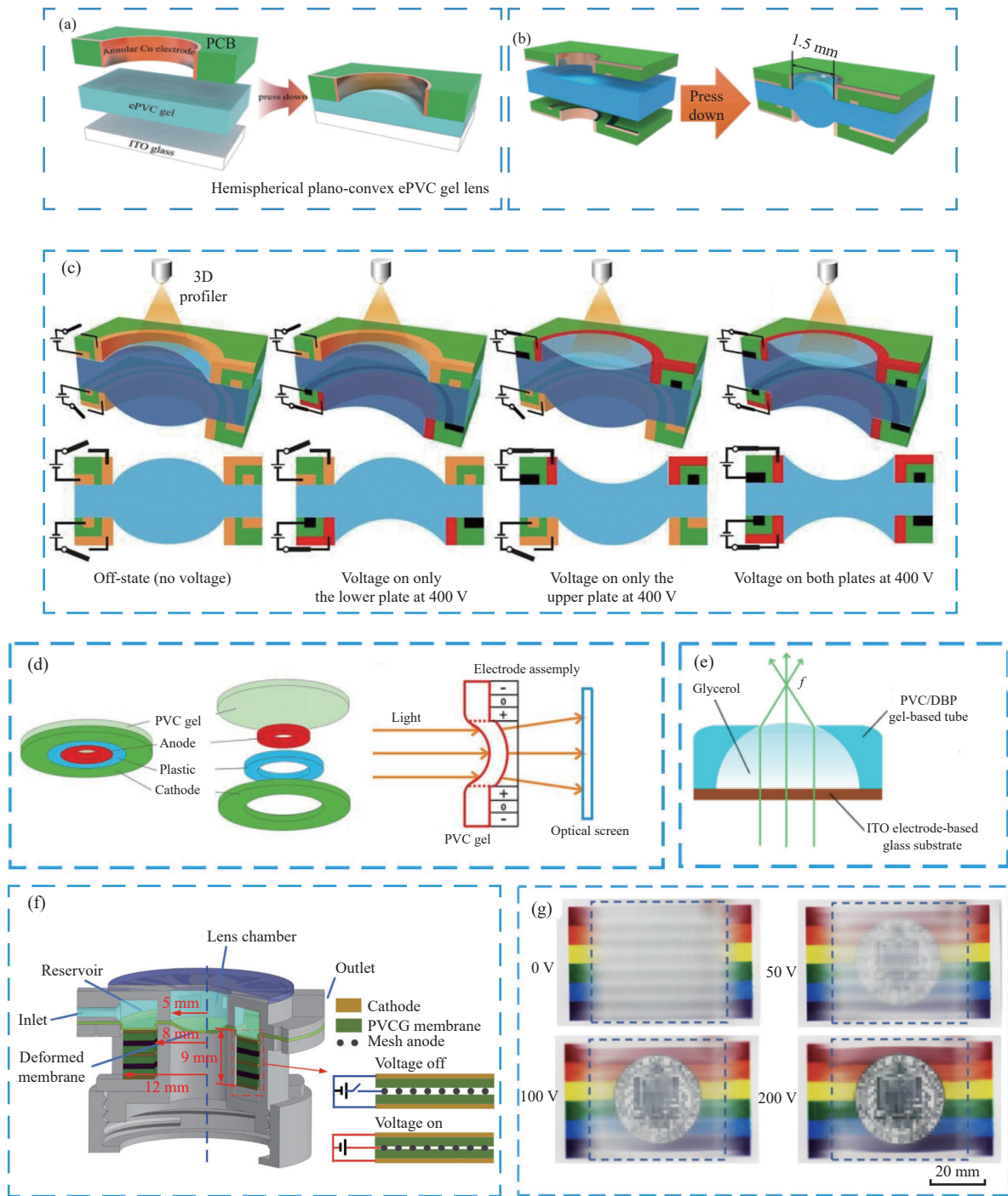


图 6 PVC 凝胶致动器的光学应用: (a) 平凸型变焦透镜^[5]; (b) 双凸透镜^[32]; (c) 形状可变的可翻转透镜^[55]; (d) 单侧电极透镜^[56]; (e) 基于 PVC 凝胶管的液体透镜^[58]; (f) 叠层 PVC 凝胶致动器驱动的液体透镜^[25]; (g) 透明度可调节的智能窗户^[31]

Fig. 6 Optical applications of PVC gel actuators: (a) Plano-convex varifocal lens^[5]; (b) Double convex lens^[32]; (c) Shape-changeable invertible microlens^[55]; (d) Unilateral electrode lens^[56]; (e) PVC gel tube-based liquid lens^[58]; (f) Stacked PVC gel actuators driven liquid lens^[25]; (g) Transparency tunable smart window^[31]

缺失导致材料改性及结构设计缺乏有效的理论指导, 使得相关研究存在一定程度的盲目性, 难以精准调控其性能以满足实际应用需求。

(2) 掺杂改性。掺杂功能添加剂是目前 PVC 凝胶改性的主要技术途径。然而, 现有改性研究多基于试错法和经验性探索, 存在实验效率低、改性效果可控性差等问题。随着人工智能技术的快速发展, 特别是深度学习方法的广泛应用, 将其引入 PVC 凝胶的掺杂改性研究, 有望实现材料配方的智能优化, 显著提升实验效率并降低研发成本。

(3)PVC 凝胶致动器的运动控制研究。PVC 凝胶致动器在微流体操控、细胞力学拉伸实验、微型变焦光学系统等领域展现出重要应用价值,其输出位移与驱动力的控制精度直接影响集成设备的整体性能指标。然而,现有研究在致动器的精密运动控制和输出稳定性方面仍存在明显不足。近期的研究表明 PVC 凝胶材料具有驱动和传感的双重功能特性。因此,开发具有传感-驱动一体化功能的智能型 PVC 凝胶致动器,不仅能够实现闭环运动控制,提升输出精度,更能为柔性智能器件的创新发展提供新的技术路径。

(4)PVC 凝胶的规模化制备技术。目前 PVC 凝胶的制备技术主要局限于实验室规模,存在制备效率低、批次间性能差异显著等关键问题,这些问题严重制约了 PVC 凝胶材料的实际应用推广。为实现该材料在工程领域的广泛应用,亟需开发具有良好可重复性和规模化生产潜力的制备工艺。

总之,作为一种极具潜力的人工肌肉,PVC 凝胶致动器因其变形大、响应速率快、能量密度高、循环寿命长、成本低等优点,在柔性驱动、医疗康复、智能光学等领域具有广阔的应用前景。未来,随着人工智能技术的进步和对 PVC 凝胶变形机理的深入研究,将会进一步促进 PVC 凝胶的发展,有望在智能穿戴、环保节能等领域表现出独特的优势,推动相关产业的创新发展。

参考文献:

- [1] RAHMAN M H, WERTH H, GOLDMAN A, HIDA Y, DIESNER C, LANE L, MENEZES P L. Recent progress on electroactive polymers: Synthesis, properties and applications [J]. *Ceramics*, 2021, 4(3): 516-541.
- [2] LI Y, ZHU H, ZHANG Z, ZHU L, ZHANG X, GUO M, HASHIMOTO M. Plasticized polyvinyl chloride: from material properties to flexible applications [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2025, 337: 103384.
- [3] LI Y, HASHIMOTO M. Design and prototyping of a novel lightweight walking assist wear using PVC gel soft actuators [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 239: 26-44.
- [4] XU M T, ZHU Y, WEI C, LIU L, ZHU Z, TANG Z H, LI Y Q, FU S Y. Soft artificial muscle of poly(vinyl chloride) gel with an imperceptible liquid metal electrode [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(46): 63851-63860.
- [5] BAE J W, YEO M, SHIN E J, PARK W H, LEE J E, NAM B U, KIM S Y. Eco-friendly plasticized poly(vinyl chloride)-acetyl tributyl citrate gels for varifocal lens [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(115): 94919-94925.
- [6] GUO Y, LIU L, LIU Y, LENG J. Review of dielectric elastomer actuators and their applications in soft robots [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 3(10): 2000282.
- [7] BHANDARI B, LEE G Y, AHN S H. A review on IPMC material as actuators and sensors: Fabrications, characteristics and applications [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13: 141-163.
- [8] LI Y, GUO M, LI Y. Recent advances in plasticized PVC gels for soft actuators and devices: A review [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(42): 12991-13009.
- [9] SHIN E J, PARK W H, KIM S Y. Fabrication of a high-performance bending actuator made with a PVC gel [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(8): 1284.
- [10] ALI M, UEKI T, HIRAI T, SATO T, SATO T. Dielectric and electromechanical studies of plasticized poly(vinyl chloride) fabricated from plastisol [J]. *Polymer International*, 2013, 62(3): 501-506.
- [11] ALI M, HIRAI T. Effect of plasticizer on the electric-field-induced adhesion of dielectric PVC gels [J]. *Journal of Materials Science*, 2012, 47: 3777-3783.
- [12] UDDIN M Z, WATANABE M, SHIRAI H, HIRAI T. Effects of plasticizers on novel electromechanical actuations with different poly(vinyl chloride) gels [J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2003, 41(18): 2119-2127.
- [13] HIRAI T, ALI M, OGIWARA T, TSURUMI D, YAMAMOTO K, UEKI T, XIA H, HASHIMOTO M. Characteristic electrical actuation of plasticized poly(vinyl chloride): Various electrical functions in relation with the dielectric plasticizers [J]. *Advances in Science and Technology*, 2013, 79: 1-6.
- [14] YOON J U, OH S J, BAE J W. Environmentally friendly electroactive poly(vinyl chloride) gel-based focus-tunable microlens [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2025, 146: 431-440.
- [15] LI S, HUANG J, XIAO H, LIANG X, WANG M, LI M, JIN G. Experimental investigation and simulations of the microstructure and actuation performance of PVC gels with varying plasticizers [J]. *Journal of Materials Science*, 2025, 60(12): 5634-5647.
- [16] AOKI Y. A preparation method of thermoreversible poly(vinyl chloride) gels [J]. *Macromolecules*, 2001, 34(10): 3500-3502.
- [17] HIRAI T, XIA H, HIRAI K. The effects of adding ionic liquids to plasticized PVC gel actuators[C]//Proceedings of the 2010 IEEE

- International Conference on Mechatronics and Automation. Xi'an: IEEE, 2010: 71-76.
- [18] LI B, LIU Z, LIU Y D, LIANG Y. Effect of ionic liquids on structure and electromechanical properties of plasticized polyvinyl chloride (PVC) gels [J]. *Polymer*, 2024, 294: 126714.
- [19] PARK W H, SHIN E J, YUN S, KIM S Y. An enhanced soft vibrotactile actuator based on ePVC gel with silicon dioxide nanoparticles [J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2018, 11(1): 22-29.
- [20] HWANG T, FRANK Z, NEUBAUER J, KIM K J. High-performance polyvinyl chloride gel artificial muscle actuator with graphene oxide and plasticizer [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 9658.
- [21] HUANG J, ZHANG X, LIU R, DING Y, GUO D. Polyvinyl chloride-based dielectric elastomer with high permittivity and low viscoelasticity for actuation and sensing [J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1483.
- [22] LI Y, SUN B, FENG X, GUO M, LI Y, HASHIMOTO M. A novel electroactive plasticized polymer actuator based on chlorinated polyvinyl chloride gel [J]. *RSC Advances*, 2021, 11(58): 36439-36449.
- [23] ZHANG X, ZHANG C, HANKETT J M, CHEN Z. Molecular surface structural changes of plasticized PVC materials after plasma treatment [J]. *Langmuir*, 2013, 29(12): 4008-4018.
- [24] ALI M, HIRAI T. Characteristics of the creep-induced bending deformation of a PVC gel actuator by an electric field [J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46: 7681-7688.
- [25] ZHANG C, QIN J, GAO Y, CAO L, LIU X, ZHU Z. Soft lenses with large focal length tuning range based on stacked PVC gel actuators [J]. *Smart Materials and Structures*, 2024, 33(9): 095002.
- [26] DONG C, ZHU Z, LI Z, SHI X, CHENG S, FAN P. Design of fishtail structure based on oscillating mechanisms using PVC gel actuators [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 341: 113588.
- [27] HELPS T, TAGHAVI M, ROSSITER J. Thermoplastic electroactive gels for 3D-printable artificial muscles [J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(8): 085001.
- [28] WU Y, YU M, TIAN C, VOKOUN D, HU R, GE H, ZHANG H, STACHIV I. Enhanced performance of electro-responsive PVC gel actuators prepared by advanced rapid thermal melting technique [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 401: 134945.
- [29] 罗斌, 陈花玲, 徐雪杰, 汝杰, 朱子才. 电话性聚合物 PVC 凝胶材料的 3D 直写打印工艺 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(11): 76-82.
- [30] LUO B, CHEN H L, XU X J, RU J, ZHU Z C. Printing electroactive polymer polyvinyl chloride (PVC) gel via direct writing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(11): 76-82.
- [31] LUO B, LU H, ZHONG Y, ZHU K, WANG Y. Carbon nanotube-doped 3D-printed silicone electrode for manufacturing multilayer porous plasticized polyvinyl chloride gel artificial muscles [J]. *Gels*, 2024, 10(7): 416.
- [32] WANG Z, WANG Y, WANG Z, HE Q, LI C, CAI S. 3D printing of electrically responsive PVC gel actuators [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(20): 24164-24172.
- [33] CHOI D S, JEONG J, SHIN E J, KIM S Y. Focus-tunable double convex lens based on non-ionic electroactive gel [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20133-20141.
- [34] YAMANO M, OGAWA N, HASHIMOTO M, TAKASAKI M, HIRAI T. A contraction type soft actuator using poly vinyl chloride gel[C]//Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Bangkok: IEEE, 2009: 745-750.
- [35] LIU C, BUSFIELD J J, ZHANG K. An electric self-sensing and variable-stiffness artificial muscle [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(9): 2300131.
- [36] LI Y, ZHU L, ZHANG Z, ZHU H, GUO M, LI Z, LI Y, HASHIMOTO M. Modular multilayered PVC gel soft actuators for novel lightweight humanoid facial robot [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 378: 115825.
- [37] HELPS T, TAGHAVI M, ROSSITER J. Towards electroactive gel artificial muscle structures[C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) XX. Bellingham, Washington, USA: SPIE, 2018: 23-30.
- [38] PARK W H, SHIN E J, YOO Y, CHOI S, KIM S Y. Soft haptic actuator based on knitted PVC gel fabric [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(1): 677-685.
- [39] HIRAI T, KOBAYASHI S, HIRAI M, YAMAGUCHI M, UDDIN M Z, WATANABE M, SHIRAI H. Bending induced by creeping of plasticized poly(vinyl chloride) gel[C]//Proceedings of SPIE 5385, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD). San Diego: SPIE, 2004: 433-441.
- [40] FURUSE A, HASHIMOTO M. Development of novel textile and yarn actuators using plasticized PVC gel[C]//Proceedings of SPIE 10163, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2017. San Diego: SPIE, 2017: 396-402.
- [41] LI Y, LI Y, HASHIMOTO M. Low-voltage planar PVC gel actuator with high performances [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 282: 482-489.
- [42] LI Y, FENG X, ZHU L, ZHANG Z, GUO M, LI Y, HASHIMOTO M. High performance fiber-constrained plasticized PVC gel

- actuators for soft robotics [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 393: 134177.
- [42] LI Y, FENG X, ZHU L, ZHANG Z, GUO M, LI Z, LI Y, HASHIMOTO M. Modeling of fiber-constrained planar PVC gel actuators [J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(9): 1483.
- [43] WANG Z, DONG Y, ANNAPOORANAN R, LI C, CHAMBERS R, CAI S. PVC gel-based electro-adhesion on extremely rough surfaces [J]. *Applied Materials Today*, 2024, 38: 102189.
- [44] GRAVERT S D, VARINI E, KAZEMIPOUR A, MICHELIS M Y, BUCHNER T, HINCHET R, KATZSCHMANN R K. Low-voltage electrohydraulic actuators for untethered robotics [J]. *Science Advances*, 2024, 10(1): eadi9319.
- [45] KIM H, MA J, KIM M, NAM J, KYUNG K U. High-output force electrohydraulic actuator powered by induced interfacial charges [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2021, 3(5): 2100006.
- [46] JANG S Y, CHO M, KIM H, CHOI M, MUN S, YOUN J H, PARK J, HWANG G, HWANG I, YUN S. Dynamically reconfigurable shape-morphing and tactile display via hydraulically coupled mergeable and splittable PVC gel actuator [J]. *Science Advances*, 2024, 10(39): eadq2024.
- [47] PARK W H, BAE J W, SHIN E J, KIM S Y. Development of a flexible and bendable vibrotactile actuator based on wave-shaped poly(vinyl chloride)/acetyl tributyl citrate gels for wearable electronic devices [J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(11): 115020.
- [48] LI Y, SUN B, CHEN T, HU B, GUO M, LI Y. Design and prototyping of a novel gripper using PVC gel soft actuators [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2021, 60(8): 087001.
- [49] CHANG K J, KYUNG K U, KIM H, HONG S, PARK D C. Development of a new PVC-gel actuator for implementing emotional vibration[R]. Warendale, Pennsylvania, USA: SAE International, 2023.
- [50] LI Y, MAEDA Y, HASHIMOTO M. Lightweight, soft variable stiffness gel spats for walking assistance [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015, 12(12): 175.
- [51] LI Y, HASHIMOTO M. PVC gel soft actuator-based wearable assist wear for hip joint support during walking [J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(12): 125003.
- [52] LIU C, ZHANG K. A wearable finger tremor-suppression orthosis using the PVC gel linear actuator [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(4): 3854-3861.
- [53] TIAN C, YU M, WU Y, YIN G, HU R, GE H, TONG X, WANG G, LI H. Dynamic braille display based on surface-structured PVC gel [J]. *Smart Materials and Structures*, 2024, 33(3): 035018.
- [54] 王延杰, 徐望舒, 赵春, 汝杰, 罗斌, 朱子才. 聚氯乙烯电活性凝胶材料研究进展 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(12): 151-157.
- WANG Y J, XU W S, ZHAO C, RU J, LUO B, ZHU Z C. Progress of polyvinyl chloride electroactive gel [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(12): 151-157.
- [55] BAE J W, CHOI D S, YUN I H, HAN D H, OH S J, KIM T H, CHO J H, LIN L, KIM S Y. Electrically adaptive and shape-changeable invertible microlens [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(8): 10397-10408.
- [56] CHENG X, YANG W, CHENG L, YAN H, JIAO Z. Tunable-focus negative poly(vinyl chloride) gel microlens driven by unilateral electrodes [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(15): 46136.
- [57] XU M, LIU Y, BIAN Z, CHANG X, LU H. Low voltage driven microlens array based on ionic liquid doped polyvinyl chloride gels [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 401: 124716.
- [58] SONG X, ZHANG H, LI D, JIN Q, JIA D, LIU T, WANG C. Liquid lens with large focal length tunability fabricated in a polyvinyl chloride/dibutyl phthalate gel tube [J]. *Langmuir*, 2020, 36(6): 1430-1436.

(责任编辑: 王吉晶)